

TÜBINGEN

Aus dem Tropenmedizinischen Institut der Universität Tübingen

Ehem. Direktor: Professor Dr. med. L. Fischer

Der Einfluß der Luftfeuchtigkeit
auf die Körpertemperaturen
und die Wärmedurchgangszahlen der Hand
unterhalb des Behaglichkeitsbereiches

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Gerhard Kolb
aus Walddorf

1967

9097

LANE MEDICAL LIBRARY
STANFORD UNIVERSITY
300 PASTEUR
PALO ALTO, CALIFORNIA

Aus dem Tropenmedizinischen Institut der Universität Tübingen

Ehem. Direktor: Professor Dr. med. L. Fischer

Der Einfluß der Luftfeuchtigkeit
auf die Körpertemperaturen
und die Wärmedurchgangszahlen der Hand
unterhalb des Behaglichkeitsbereiches

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin
einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Gerhard Kolb
aus Walddorf

1967

Dekan: Professor Dr. W. Schneider

1. Berichterstatter: Dozent Dr. W. Höfler

2. Berichterstatter: Professor Dr. H. J. Knüttgen

INHALTSVERZEICHNIS

A) BELEUCHTUNG

1) Das Licht als physikalisches Größe	1
2) Die Eigenschaften des Lichts	2
3) Gegenüberstellung des Lichts	3

Meinen Eltern gewidmet

B) ANSCHAUUNG

1) Die Lichtstrahlung	4
2) Abstrahlung des Lichts	5
3) Die Lichtausbreitung nach Newton	6
4) Die Lichtgeschwindigkeit	7
5) Die Lichtreflexion	8
6) Lichtrefraktion	10

C) BEGRIFFLICH

1) Beschreibung des Lichts	12
2) Lichtausbreitung des Lichts	13
3) Lichtreflexion	14
4) Lichtrefraktion	15
5) Lichtrefraktion	16
6) Lichtrefraktion	17
7) Lichtrefraktion	18
8) Lichtrefraktion	19
9) Lichtrefraktion	20
10) Lichtrefraktion	21
11) Lichtrefraktion	22
12) Lichtrefraktion	23
13) Lichtrefraktion	24
14) Lichtrefraktion	25
15) Lichtrefraktion	26
16) Lichtrefraktion	27
17) Lichtrefraktion	28
18) Lichtrefraktion	29
19) Lichtrefraktion	30
20) Lichtrefraktion	31
21) Lichtrefraktion	32
22) Lichtrefraktion	33
23) Lichtrefraktion	34
24) Lichtrefraktion	35
25) Lichtrefraktion	36
26) Lichtrefraktion	37
27) Lichtrefraktion	38
28) Lichtrefraktion	39
29) Lichtrefraktion	40
30) Lichtrefraktion	41
31) Lichtrefraktion	42
32) Lichtrefraktion	43
33) Lichtrefraktion	44
34) Lichtrefraktion	45
35) Lichtrefraktion	46
36) Lichtrefraktion	47
37) Lichtrefraktion	48
38) Lichtrefraktion	49
39) Lichtrefraktion	50
40) Lichtrefraktion	51
41) Lichtrefraktion	52
42) Lichtrefraktion	53
43) Lichtrefraktion	54
44) Lichtrefraktion	55
45) Lichtrefraktion	56
46) Lichtrefraktion	57
47) Lichtrefraktion	58
48) Lichtrefraktion	59
49) Lichtrefraktion	60
50) Lichtrefraktion	61
51) Lichtrefraktion	62
52) Lichtrefraktion	63
53) Lichtrefraktion	64
54) Lichtrefraktion	65
55) Lichtrefraktion	66
56) Lichtrefraktion	67
57) Lichtrefraktion	68
58) Lichtrefraktion	69
59) Lichtrefraktion	70
60) Lichtrefraktion	71
61) Lichtrefraktion	72
62) Lichtrefraktion	73
63) Lichtrefraktion	74
64) Lichtrefraktion	75
65) Lichtrefraktion	76
66) Lichtrefraktion	77
67) Lichtrefraktion	78
68) Lichtrefraktion	79
69) Lichtrefraktion	80
70) Lichtrefraktion	81
71) Lichtrefraktion	82
72) Lichtrefraktion	83
73) Lichtrefraktion	84
74) Lichtrefraktion	85
75) Lichtrefraktion	86
76) Lichtrefraktion	87
77) Lichtrefraktion	88
78) Lichtrefraktion	89
79) Lichtrefraktion	90
80) Lichtrefraktion	91
81) Lichtrefraktion	92
82) Lichtrefraktion	93
83) Lichtrefraktion	94
84) Lichtrefraktion	95
85) Lichtrefraktion	96
86) Lichtrefraktion	97
87) Lichtrefraktion	98
88) Lichtrefraktion	99
89) Lichtrefraktion	100
90) Lichtrefraktion	101
91) Lichtrefraktion	102
92) Lichtrefraktion	103
93) Lichtrefraktion	104
94) Lichtrefraktion	105
95) Lichtrefraktion	106
96) Lichtrefraktion	107
97) Lichtrefraktion	108
98) Lichtrefraktion	109
99) Lichtrefraktion	110
100) Lichtrefraktion	111



Digitized by the Internet Archive
in 2026

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
A) EINLEITUNG	
1) Das Klima als komplexe Größe	1
2) Die Regulation des Wärmehaushalts in Ruhe	2
3) Fragestellung dieser Arbeit	4
B) METHODIK	
1) Die Klimakammer	6
2) Meßprogramm und verwendete Geräte	6
3) Die Kalorimeterpille nach Aschoff	7
4) Die Versuchspersonen	8
5) Das Versuchsprogramm	9
6) Auswertungsmethoden	10
C) ERGEBNISSE	
1) Beschreibung von 4 typischen Kurvenverläufen	12
2) Zusammenstellung der Akrentemperaturen von Vp K und Vp P	17
3) Besprechung der Extremitätentemperaturen von Vp H	18
4) Weitere Ergebnisse: Das Verhalten von Kerntemperatur, Integraler Hauttemperatur, Frigorigraphenwerten, Puls und Atmung	20
5) Die Wärmedurchgangszahl k_l in Abhängigkeit vom Dampfdruck P_d	21
6) Die Änderung des Wärmestroms Q während des Versuchs- verlaufs und seine Abhängigkeit von der Temperatur- differenz Kern - Hand (T_{k-h})	25

D) DISKUSSION

- 1) Der Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die
Körpertemperaturen 29
- 2) Die mit der Kalorimeterpille gemessenen Wärme-
durchgangszahlen und ihre Abhängigkeit von der
Luftfeuchtigkeit 36
- 3) Frigorigraphenwerte und Integrale Hauttemperatur
unterhalb des Indifferenzbereiches 37

E) ZUSAMMENFASSUNG 38

F) LITERATURVERZEICHNIS 39

Lebenslauf

A) EINLEITUNG

1) Das Klima als komplexe Größe

Es ist eine bekannte Tatsache, daß für die subjektive und objektive Wirkung eines bestimmten Klimazustandes auf den Menschen nicht nur die Lufttemperatur verantwortlich ist. Das sprichwörtliche "Waschküchenklima" unterscheidet sich von einem Klima im Freien mit gleicher Lufttemperatur durch den höheren Wasserdampfgehalt, durch die fehlende Luftbewegung und durch die hohe Temperatur der Umgebung (Waschkessel).

Aus diesem Beispiel sind die wesentlichsten Faktoren ersichtlich, die neben der Lufttemperatur die thermische Gesamtwirkung eines bestimmten Luftzustandes ausmachen: Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Strahlungstemperatur der Umgebung. Verschiedene Kombinationen dieser vier Größen können im Hinblick auf die Thermoregulation gleichen Effekt haben.

Für bestimmte Arbeitsplätze in der Industrie (z.B. die sog. Hitzebetriebe) ist es von Interesse, die physiologische Wirkung verschiedener Klimabedingungen miteinander vergleichen zu können, um danach z.B. Arbeitszeit und Hitzezulage entsprechend zu dosieren. Deswegen hat man sich bemüht, einen einzigen, möglichst einfachen Zahlenwert zu finden, der den Einfluß der verschiedenen Klimafaktoren in sich vereinigt. Eine Vielzahl solcher Versuche ist unternommen worden. Hier sei nur die "Effektiv-Temperatur" erwähnt, die von Yaglou 1927 eingeführt wurde. Rein empirisch wurden in Klimakammerversuchen mit Hilfe einer großen Anzahl von Versuchspersonen verschiedene Kombinationen der einzelnen Klimafaktoren gesucht, die subjektiv als gleich empfunden wurden. Die Temperatur, die bei 100 % rel. Feuchte und Windstille dieselbe Wärmeempfindung macht wie eine bestimmte Kombination der verschiedenen Klimafaktoren wird als Effektiv-Temperatur bezeichnet. Auf diese Weise wurden Nomogramme zusammengestellt, aus denen mit Hilfe der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Windgeschwindigkeit die Effektiv-Temperatur abgelesen werden kann. - Die "korrigierte Effektiv-Temperatur" von Vernon und Warner 1932 berücksichtigt auch die Einstrahlung von der Umgebung, indem anstelle der Trockentemperatur die sog. Globustemperatur eingesetzt wird.

Auf der anderen Seite wurden verschiedene "Summenwertgeräte" konstruiert, die die thermische Wirkung der komplexen Größe Klima zu einer Meßgröße verarbeiten. Diese Geräte werden vor allem in der Freilufttherapie zur Beurteilung eines Klimas herangezogen. Eines der bekanntesten ist der Frigorigraph nach Pfeleiderer und Büttner. Zu seiner Konstruktion wurden experimentell gefundene Daten des menschlichen Körpers verwandt. Es handelt sich um eine von innen elektrisch beheizte Kugel, deren Durchmesser aus dem mittleren Krümmungsgrad des menschlichen Körpers berechnet wurde (Wärmeübergangskoeffizienten für Leitung und Konvektion), deren Farbe der mittleren Hautfarbe entspricht (Absorptionszahl für Ein- und Abstrahlung) und deren Heizenergie zu einer Oberflächentemperatur führt, die der menschlichen Hauttemperatur unter thermisch indifferenten Bedingungen entspricht. Gemessen wird die Oberflächentemperatur der Kugel (Abkühlungsgröße), die sich je nach Wahl der Klimafaktoren auf einen Wert einstellt, bei dem Gesamtwärmeabgabe (Strahlung, Leitung, Konvektion) = Gesamtwärmezufuhr ist (Heizung, Einstrahlung). Die Abkühlungsgröße ist nach Pfeleiderer gut korreliert mit der Integralen Hauttemperatur des Menschen. Es ergibt sich aber aus dem Konstruktionsprinzip, daß unter Bedingungen, die zur Schweißsekretion führen, diese Beziehung gestört sein muß.

2) Die Regulation des Wärmehaushalts in Ruhe

Das Ziel jeder Wärmeregulation ist die ausgeglichene Bilanz: Wärmeabgabe = Wärmezufuhr. Da die Wärmebildung eng mit dem Gesamtstoffwechsel des Körpers gekoppelt ist, kann sie nur in relativ geringem Umfang variiert werden und wird nur unterhalb des Indifferenzbereichs (s.u.) zur Wärmeregulation herangezogen. Das eigentlich freie Stellglied, über das die Regulation erfolgt, ist die Wärmeabgabe.

Im Hinblick auf den Wärmehaushalt können am Körper zwei funktionell verschiedene Teile unterschieden werden: Kern und Schale. Als Kern fungieren hauptsächlich die Organe der großen Leibeshöhlen, welche in Ruhe mit ungefähr 8 % des Körpergewichts 70 % der gesamten Wärme produzieren. Diese Wärme muß - fast ausschließlich auf dem Blutwege - in die Schale transportiert werden von wo sie an die Umgebung abgegeben wird (durch Leitung, Konvektion, Strahlung, Wasserverdunstung). Die Schale wird durch die gesamte Hautoberfläche, in erster Linie aber durch die Extremitäten repräsentiert. Letztere sind aus geometrischen (günstiges Oberflächen/Volumen-Verhältnis) und physiologischen Gründen (große Variationsmöglichkeit der Durchblutung) am besten geeignet, die Wärmeabgabe zu steuern ("Effektoren der Temperatur - Regulation", Aschoff

1958 b). Aus diesem Grunde sind auch die Extremitätentemperaturen für einen bestimmten Regulationszustand kennzeichnender als die Integrale Hauttemperatur (Aschoff 1958 a. Koe und Höfler 1963).

Theoretisch kann der Wärmestrom Kern-Umgebung in zwei Abschnitte unterteilt werden;

- 1) innerer Wärmestrom: Kern - Haut und
- 2) äußerer Wärmestrom: Haut - Umgebung.

$$[1] \quad \text{ad 1)} \quad Q_i = k_i (T_k - T_h) \quad [\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}]$$

$$[2] \quad \text{ad 2)} \quad Q_a = k_a (T_h - T_u) \quad [\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}]$$

Dabei bedeuten: T_k , T_h , T_u die Kern-, Haut- und Umgebungstemperatur, k_i und k_a die innere und äußere Wärmetransportzahl. Bei ausgeglichener thermischer Regulation ist innerer = äußerer Wärmestrom, d.h.

$$[3] \quad Q_i = Q_a = k_i (T_k - T_h) = k_a (T_h - T_u)$$

k_i und k_a fassen alle Bedingungen zusammen, die den Wärmetransport Kern - Haut und Haut - Umgebung beeinflussen können. k_i , die sog. Wärmedurchgangszahl kann experimentell nach der Formel

$$[4] \quad k_i = \frac{Q_i}{T_k - T_h} \quad [\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$$

erhalten werden. Sie wird beeinflusst von der Dicke der Schale, der Wärmeleitfähigkeit des Gewebes, den Wärmeübergangsbedingungen an Grenzflächen (Aschoff 1958 a) und gibt an, wieviel cal pro cm^2 Körperoberfläche in einer Minute bei 1°C Temperaturdifferenz Kern - Haut vom Körper abgegeben werden. Bei den plethysmographischen Durchblutungsmessungen von Aschoff fand sich eine strenge Korrelation zwischen Wärmedurchgangszahl und Durchblutung. Dies unterstreicht die Bedeutung dieser praktisch leicht meßbaren Größe für die Diagnostik peripherer Durchblutungsstörungen in der modernen Medizin.

Die oben angegebenen Beziehungen gelten in erster Linie im sog. Indifferenzbereich (= Behaglichkeitsbereich), in welchem die gesamte Wärmeabgabe durch Änderung der Schalendurchblutung gesteuert wird (vasomotorische Regulation). Dieser ist nach oben hin begrenzt durch das Auftreten aktiver

Schweißsekretion bei $30 - 31^{\circ}\text{C}$ Raumtemperatur (physikalische Regulation). Die untere Grenze ist durch die Kritische Temperatur gegeben, unterhalb welcher der ruhende nackte Körper seine Wärmebildung steigern muß, um nicht allmählich vollständig auszukühlen (Muskelzittern, chemische Regulation). Diese untere Grenze des Indifferenzbereichs ist deswegen nicht scharf anzugeben, weil die Isolationskraft der Schale interindividuell sehr stark schwankt. Die Isolationskraft ist abhängig vom subkutanen Fettpolster und der Fähigkeit zur Vaso-konstriktion. Die Kritische Temperatur liegt nach verschiedenen Angaben zwischen 26° und 28°C Außentemperatur.

3) Fragestellung dieser Arbeit

Verschiedene Autoren sind zu dem Ergebnis gekommen (Kisskalt, McConnel und Yaglou, Talbott, zit. nach Högger 1947), daß die Luftfeuchtigkeit, abgesehen von ganz extremen Bedingungen, kaum einen Einfluß auf die Hauttemperatur hat. Dies ist erstaunlich, denn es wäre sonderbar, wenn eine Änderung der Luftfeuchtigkeit die äußere Wärmeübergangszahl nicht in irgendeiner Weise beeinflussen und damit das ganze Gleichgewicht stören würde (s. Formel 3). Die nächstliegende Reaktion des Körpers darauf wäre eine Veränderung von k_i im Sinne einer Durchblutungsvariation, was eine Änderung der Hauttemperatur zur Folge hätte. - Ein solcher Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die Hauttemperatur ist von Thauer und Mitarbeitern gefunden und von W. Müller in Versuchen, die dieser Arbeit unmittelbar vorangingen, bestätigt worden. Es fanden sich steigende Hauttemperaturen mit zunehmendem Dampfdruck. Zur Erklärung dieser Befunde können die Ergebnisse von Thauer und Mitarb. und von Büttner herangezogen werden, die eine Abnahme der Perspiratio insensibilis bei zunehmendem Dampfdruck fanden. Das käme einer Verschlechterung der äußeren Wärmeübergangsbedingungen gleich, welche durch eine Erhöhung der Hauttemperatur kompensiert würde.

Die bisherigen Versuche zu diesem Thema fanden alle im, bzw. über dem Indifferenzbereich statt. Außerdem wurde teilweise unter sehr extremen Bedingungen gearbeitet (Thauer: $8 - 92\%$ rel. Luftfeuchtigkeit).

In der vorliegenden Arbeit wurde der Temperaturbereich untersucht, der sich nach unten direkt an die Behaglichkeitszone anschließt (23 und 20°C). Mit der Luftfeuchtigkeit wurde nur in relativ geringem Umfang von der Schwülegrenze nach Scharlau abgewichen ($6 - 18\text{ mm Hg}$), Feuchtigkeiten, wie sie unter natür-

lichen Bedingungen auch vorkommen.

Somit ergab sich im einzelnen folgende Fragestellung:

- 1) Wie verhalten sich in diesem Bereich die Körpertemperaturen (unter besonderer Berücksichtigung der Extremitätentemperaturen) in Abhängigkeit vom Dampfdruck der Luft?
- 2) Wie ändern sich die Wärmedurchgangszahlen der Hand bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten, und lassen sich daraus gewisse Schlüsse auf die Art der Regulation ziehen?
- 3) Besteht unterhalb der Kritischen Temperatur eine Korrelation zwischen Anzeige des Frigorigraphen nach Pfeleiderer und Büttner und der Integralen Hauttemperatur bzw. den Extremitätentemperaturen?
Wenn ja, wie wird sie durch die Luftfeuchtigkeit beeinflusst?

B) METHODIK

1) Die Klimakammer

Die Versuche wurden in einer Klimakammer der Firma Meissner und Wurst (Stuttgart) durchgeführt, die an anderer Stelle genau beschrieben ist (s. W. Müller: "Der Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die Körpertemperaturen im Behaglichkeitsbereich").

Die Wandtemperatur lag während der Versuche $0,5^{\circ}\text{C}$ unter der Lufttemperatur. An Boden, Hinterwand und Decke der Kammer herrschte eine Luftströmung von $0,5\text{ m/sec}$. Dagegen waren die Liege der Versuchsperson und der Frigorigraph so angeordnet, daß in ihrem Bereich keine gerichtete Strömung meßbar war.

Das Klima wurde jeweils am Vorabend des Versuches eingestellt und kurz vor Versuchsbeginn, falls notwendig, nachreguliert. Zwei Versuche unter verschiedenen Bedingungen fanden an einem Tag nicht statt.

2) Meßprogramm und verwendete Geräte

Neben der Versuchsperson befand sich ein Protokolleur in der Klimakammer, der Kerntemperatur, Hauttemperaturen, Frigorimeterwerte und Klimaeinstellung (Trocken- und Feuchttemperatur) fortlaufend graphisch registrierte. Damit war der Verlauf der Regulation leicht überblickbar, und der Versuch konnte abgebrochen werden, wenn sich die Extremitätentemperaturen annähernd auf ein konstantes Niveau eingestellt hatten.

Die Trocken- und Feuchttemperatur, aus denen sich die Luftfeuchtigkeit errechnet, wurden alle 5 Minuten auf einem Psychrometer nach Assmann abgelesen, das an der Decke der Klimakammer aufgehängt war. Das Feuchtthermometer wurde in regelmäßigen Abständen vom Protokolleur mit Aqua dest. befeuchtet.

Daneben wurden alle 10 Minuten gemessen:

- 1) Zehen-, Fuß-, Unterschenkel-, Oberschenkel-, Daumen-, Hand-, Unterarm-, Oberarmtemperatur mit Thermoelementen, die durch leichtsitzende Gummibänder befestigt waren.
Stirn-, Brust-, Epigastriumtemperatur mit einem Tastelement, das von der Versuchsperson alle 10 Minuten an den entsprechenden Stellen aufgesetzt wurde.
Außerdem die Mundtemperatur mit einem Mundelement.
Alle Thermoelemente einschließlich 12-buchsigem Verteiler und Ablesegalvanometer von der Firma Ellab, Kopenhagen. Meßgenauigkeit $0,1^{\circ}\text{C}$.
- 2) Die Abkühlungsgrößen eines Frigorigraphen nach Pfeleiderer und Büttner (s. A₁), abgelesen auf einem Mehrfarben-Punktschreiber der Firma Hartmann und Braun, Frankfurt, der als Anzeigeeinstrument benutzt wurde.
- 3) Die über 10 Minuten gemittelte Pulszahl mit einem photoelektrischen Pulszähler nach E. A. Müller (Firma Himmelmann, Dortmund).
- 4) Die Atemfrequenz der Versuchsperson (eine Minute lang).
- 5) Der Wärmestrom der rechten Hand mit einer Kalorimeterpille nach Aschoff (s. u.), die durch eine leichte Plastic-Schablone und Gummibänder etwa in der Mitte des Handrückens fixiert wurde. Abgelesen wurde auf einem Multiflex-Galvanometer (Firma B. Lange, Berlin).

3) Die Kalorimeterpille nach Aschoff

Mit der Kalorimeterpille nach Aschoff wird der Wärmestrom Q gemessen, der je Flächen- und Zeiteinheit von der Oberfläche eines bestimmten Hautareals an die Umgebung abströmt $[\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}]$. Der Quotient aus Wärmestrom und der Temperaturdifferenz zwischen Kern- und Hauttemperatur des untersuchten Bereiches ergibt die Wärmedurchgangszahl des Gewebes $[\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}]$.

Der Meßkopf besteht aus einem 1 mm starken Kunststoffring von 1 cm äußerem Durchmesser, auf welchen beidseits eine dünne Kunststoffmembran aufgeklebt ist. An diesen beiden Membranen sind die Kontakte zur elektrischen Temperaturmessung angebracht. Der Wärmewiderstand der Pille wird im wesentlichen

durch das eingeschlossene Luftpolster bestimmt. Im übrigen entspricht die Konstruktion den Angaben von Wever und Aschoff (1957).

Gemessen wird die Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Unterfläche der Kalorimeterpille (die Unterfläche nimmt Hauttemperatur an). Diese Differenz ist dem gesuchten Wärmestrom proportional. Proportionalitätsfaktor ist die Wärmedurchgangszahl der Pille, welche empirisch festgestellt werden kann. Zur Eichung benötigt man einen Wärmestrom bekannter Dichte und untersucht, welche Temperaturdifferenz durch ihn an den beiden Flächen der Pille hervorgerufen wird.

Die Wärmedurchgangszahl der bei uns verwendeten Kalorimeterpille wurde zu $3,92 \cdot 10^{-2} \text{ [cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$ ermittelt.

Die Wärmedurchgangszahl k_i der Körperschale ergibt sich aus:

$$[5] \quad k_i = \frac{T_p}{T_k - T_h} k_p \quad [\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$$

wobei T_p die Temperaturdifferenz zwischen Unterfläche und Oberfläche der Pille
 k_p die Wärmedurchgangszahl der Pille
 T_k und T_h die Kern- und Hauttemperatur bedeuten.

Im Gegensatz zu bisher verwendeten Verfahren (Strömungskalorimetrie, beheizte Meßköpfe) bietet die Kalorimeterpille nach Aschoff den großen Vorteil, daß sie die physiologischen Verhältnisse und die sich abspielenden Regulationsvorgänge nicht beeinflußt. Das kleine spezifische Gewicht und die kleine spezifische Wärme des verwandten Materials ermöglichen eine Einstellungsgeschwindigkeit der Pille, mit welcher Durchblutungsschwankungen hinreichend genau erfaßt werden.

4) Die Versuchspersonen

Die Versuche wurden mit drei männlichen Versuchspersonen (Vpp) durchgeführt:

- 1) Vp. H., 40 Jahre, 186 cm, 70 kg
- 2) Vp. K., 24 Jahre, 187 cm, 79 kg
- 3) Vp. P., 23 Jahre, 181 cm, 78 kg

Vor den Versuchen wurde ein leichtes, eiweißarmes Frühstück eingenommen (mindestens 1 Stunde vor Versuchsbeginn) und nur wenig körperliche Arbeit geleistet (Weg zum Institut). Während des Versuches verzehrte die Vp bisweilen

eine Brezel. Bedenkt man die verhältnismäßig lange Versuchsdauer, so dürften die Einflüsse von Arbeit und Nahrungsaufnahme auf die Temperaturregulation, mindestens am Ende der Versuche, zu vernachlässigen sein.

Während des Versuches lag die Vp bequem auf einer horizontalen Liege, die zur Vermeidung von Wärmestauungen mit einer Plastic-Schnur gitterförmig gespannt war.

Vp H trug während der Versuche bei 20 °C eine leichte, lange Baumwollhose, kurzärmeliges Hemd und einen leichten Wollpullover. Die Thermoelemente wurden bei diesen Versuchen über den Kleidern angebracht. Bei allen übrigen Versuchen waren die Versuchspersonen nur mit einer Badehose bekleidet. Die Versuchspersonen waren immer wach und beschäftigten sich mit dem Lesen leichter Lektüre, die von kurzen Unterhaltungen mit dem Protokolleur unterbrochen wurde.

5) Das Versuchsprogramm

Es wurden insgesamt 46 Versuche unter 6 verschiedenen Bedingungen (s. u.) durchgeführt. Bei 10 Versuchen konnte aus technischen Gründen nur der Anfang ausgewertet werden.

Die drei verschiedenen Luftfeuchtigkeitsgrade wurden so ausgewählt, daß die hohe und tiefe Feuchtigkeitsstufe in relativ geringem Umfang um die Schwüle-grenze von Scharlau (14, 1 mm Hg) nach oben und unten schwankte.

Die Vorbereitungszeit, d. h. die Zeit von Versuchsbeginn bis zur ersten Messung, lag im Mittel zwischen 20 und 30 Minuten. Während dieser Zeit konnte sich die Vp schon an das Klima anpassen, so daß der stärkste Abfall der Körpertemperaturen nicht registriert wurde. Die mittlere Versuchsdauer betrug 4, 5 Stunden.

Um jahreszeitliche Schwankungen zu eliminieren wurden die Versuche jeder Vp an aufeinanderfolgenden Tagen (außer Samstag und Sonntag) durchgeführt. Alle Versuche fanden zwischen 8 und 18 Uhr statt, einer Tageszeit, in der Stoffwechsel und Körpertemperaturen relativ konstant bleiben (Koe und Höfler 1963). Außerdem fanden die Versuche einer Vp nur nachmittags statt, die der beiden anderen nur vormittags, wodurch eventuelle Tagesschwankungen noch mehr reduziert wurden. Ein zweiter Versuch am selben Tag wurde immer nur mit einer anderen Versuchsperson und unter denselben Klimabedingungen durchgeführt.

Das Versuchsprogramm im einzelnen ergibt sich aus folgender Zusammenstellung:

Versuche der Vp H vom 8. 7. - 23. 7. 1964, vormittags
 Vp K vom 31. 8. - 25. 9. 1964, vormittags
 Vp P vom 31. 8. - 28. 9. 1964, nachmittags

Trockentemperatur ° C Feuchttemperatur		Dampfdruck mm Hg	rel. Feuchte in %	durchgeführte Versuche
Sollwerte	Istwerte			
23/21	23,4/21,3	18,0	83	3H, 2K, 2(+1)P
23/19,5	23,3/19,7	15,5	73	2H, 2(+1)K, 2P
23/16	23,0/16,0	10,2	48	3H, 2(+1)K, 2(+2)P
20/18,5	20,3/18,6	15,3	85	2H, 2(+1)K, 2(+1)P
20/15	20,0/15,1	10,5	59	2(+1)K, 2(+1)P
20/12,5	20,2/12,0	6,8	39	2H, 2(+1)K, 2P

3H hinter 23/21 bedeutet, daß die Vp H unter der Bedingung 23/21 3 Versuche gemacht hat. Die in Klammern angegebenen Zahlen bezeichnen die Versuche, von denen nur der Anfang ausgewertet wurde. In obiger Tabelle sind die Sollwerte und die Mittelwerte sämtlicher Versuche angegeben. Aus den letzteren sind Dampfdruck und relative Feuchte errechnet worden. Im weiteren Verlauf der Arbeit sind im Text jeweils die Sollwerte angegeben.

6) Auswertungsmethoden

Ausgewertet wurden Anfang, Mitte und Ende eines Versuches, wobei jeweils aus 5 Messungen (im Abstand von 10 Minuten) der Mittelwert berechnet wurde. Die Auswertung "Anfang" entspricht dem Zustand in der 2. halben Stunde, die Auswertung "Mitte" dem in der 5. halben Stunde nach Versuchsbeginn. Als "Ende" wurden die 5 letzten Messungen eines Versuches ausgewertet. Diese Zeit schwankte mit der Versuchsdauer erheblich (2 - 6 1/2 Stunden nach Versuchsbeginn).

Die Integrale Hauttemperatur wurde durch Multiplikation der Körpertemperaturen mit den von Pfeleiderer angegebenen Faktoren errechnet:

Temperatur von Stirn	mal	0,12
Brust	"	0,18
Bauch	"	0,16
Oberarm	"	0,08
Unterarm	"	0,05
Hand	"	0,04
Oberschenkel	"	0,18
Unterschenkel	"	0,11
Fuß	"	0,08

Integrale Hauttemperatur = Summe

Die Dampfdruckabhängigkeit der Extremitätentemperaturen wurde durch Korrelationsrechnung geprüft. Dabei konnten jedoch nur die Werte der Vpp K und P gemeinsam ausgewertet werden, da Vp H bei allen Lufttemperaturen wesentlich höhere Hauttemperaturen einstellte als die beiden anderen Vpp (s. C₃, C₆). Die Akrentemperaturen der Vp H wurden mit dem Zeichentest untersucht.

Zur statistischen Sicherung der Dampfdruckabhängigkeit von Wärmedurchgangszahlen und Wärmeströmen wurde neben der Korrelationsrechnung der Wilcoxon-Rangtest für gepaarte Differenzen verwendet.

C) ERGEBNISSE

1) Beschreibung von 4 typischen Kurvenverläufen (Abb. 1a, 1b, 2a, 2b)

In den Abbildungen 1a - 2b ist der Temperaturverlauf der Körpertemperaturen während der Versuche aufgezeichnet. M, IT, Z, F, D, H, bedeuten die Mund-, Integrale Haut-, Zehen-, Fuß-, Daumen- und Handtemperaturen, ASS gibt die Klimateinstellung wieder, abgelesen auf dem Assmannschen Psychrometer (Trocken- und Feuchttemperatur).

Sämtliche 4 Abbildungen stammen von Versuchen derselben Versuchsperson (Vp P) und wurden zwischen dem 16. 9. und dem 28. 9. 1964 gewonnen. Die Kurven 1a und b sind bei 23 °C Umgebungstemperatur, 2a und 2b bei 20 °C registriert worden. 1a und 2a waren Versuche mit hoher, 1b und 2b solche mit relativ niedriger Luftfeuchtigkeit.

Die Bedingungen im einzelnen waren folgende (Durchschnitte während des ganzen Versuchs):

Versuch Nr.	Trockentemp./Feuchttemp. °C	Dampfdruck mm Hg	rel. Feuchte %
1a	23,2 / 21,3	18,1	84
1b	23,0 / 16,1	10,3	48,5
2a	20,2 / 18,3	14,9	83
2b	20,1 / 11,7	6,2	35

Bei allen 4 Versuchen wurde die Zeit $t = 0$ 30 Minuten nach Beginn des Versuches gemessen, so daß die Kurven synchronisiert sind. Wegen dieser Vorbereitungszeit wurde der steilste Verlauf der Temperaturkurven (von Versuchsbeginn bis $t = 0$) nicht registriert. $t = 0$ beschreibt also einen Zustand, in dem die Regulation schon im Gange war.

Die Versuchsdauer der einzelnen Versuche, ein reziprokes Maß für die thermo-

Abb 1a Verlauf der Körpertemperaturen bei 23°C und 84%RF

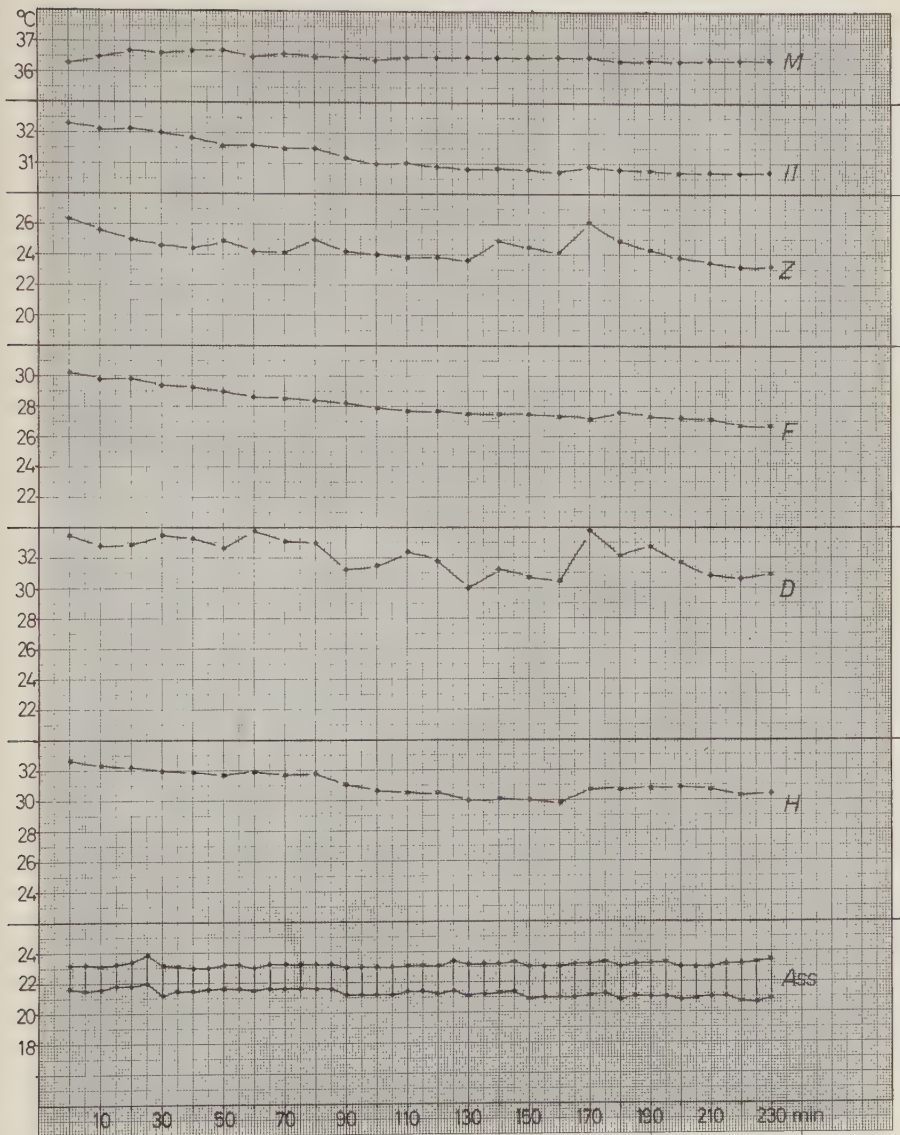


Abb 1b Verlauf der Körpertemperaturen bei 23°C und 48,5% RF

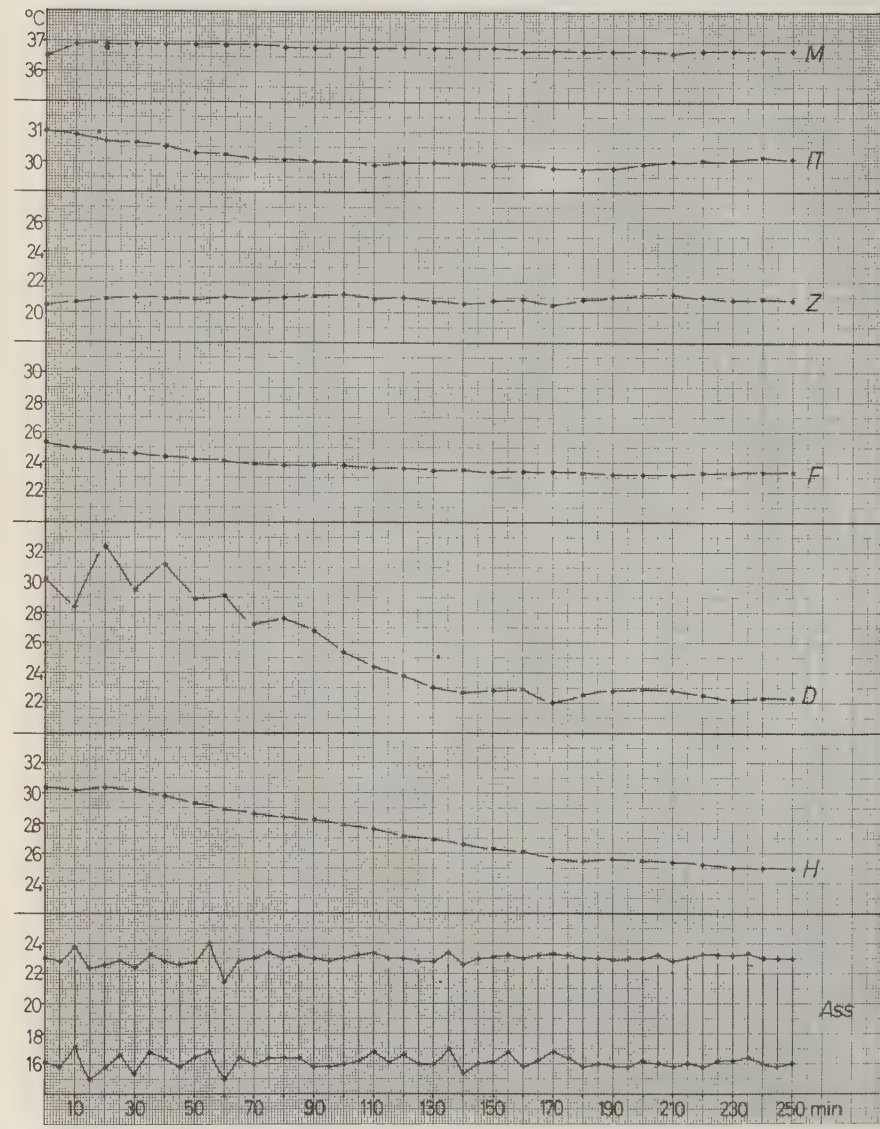


Abb 2a Verlauf der Körpertemperaturen bei 20°C und 83% R.F.

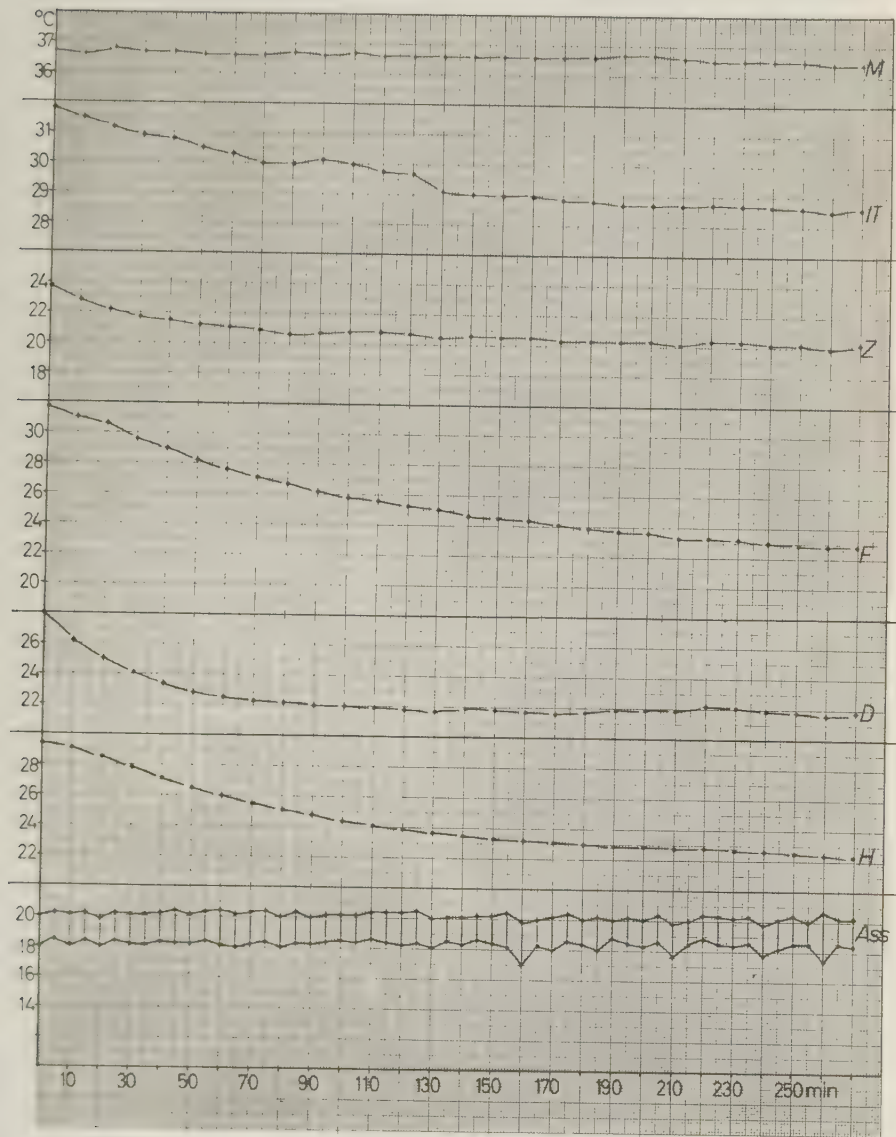
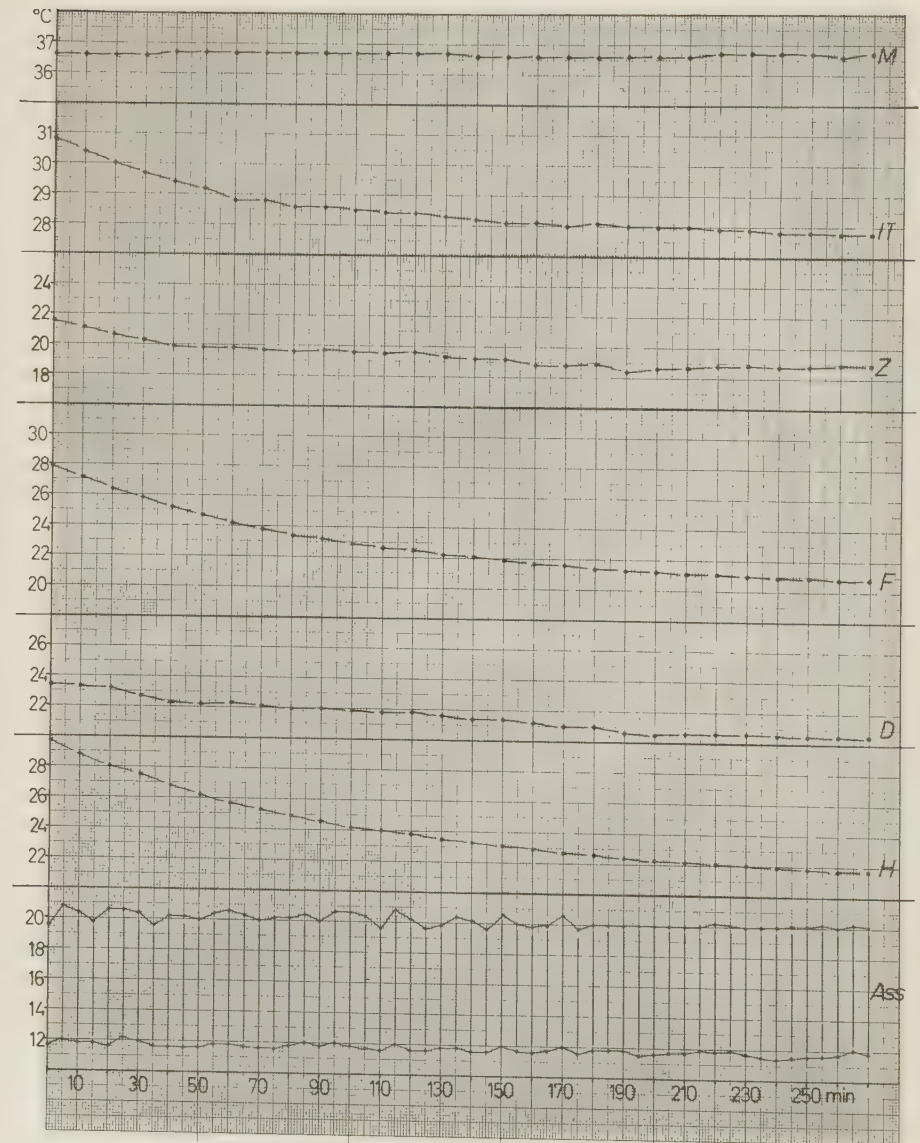


Abb 2b Verlauf der Körpertemperaturen bei 20°C und 35% R.F.



regulatorische Einstellgeschwindigkeit, bestätigt die Regel: Je höher die Umgebungstemperatur und je höher die Luftfeuchtigkeit um so schneller haben die Körpertemperaturen ihre Endeinstellung erreicht. Dies hängt mit der Entspeicherung der Schale zusammen. Natürlich muß diese bei 20°C Raumtemperatur mehr Wärme abgeben als bei 23°C , deswegen dauert es bei der tieferen Temperatur länger bis die neue, größere Schale gebildet ist. Hohe Luftfeuchtigkeiten verhalten sich in dieser Beziehung wie hohe Umgebungstemperaturen.

a) Die Versuche bei 23°C (Abb. 1a, b)

Beim Vergleich von 1a mit 1b fällt zunächst auf, daß trotz gleicher Außentemperatur schon bei $t = 0$ die Akrentemperaturen in Versuch 1b durchweg niedriger liegen. Ohne daß schon ein Ausgleich in der Wärmeregulation erreicht wäre, macht sich die verschiedene Klimawirkung schon zu Beginn des Versuchs bemerkbar.

Auch die Endeinstellung der verschiedenen Körpertemperaturen zeigt deutliche Unterschiede zwischen 1a und 1b. Die Endwerte der Extremitätentemperaturen liegen bei hoher Feuchtigkeit durchweg höher (z. T. über 8°!) Gerade entgegengesetzt verhält sich die Kerntemperatur: Sie ist bei hohem Dampfdruck niedriger. (Es soll an dieser Stelle gesagt werden, daß die Unterschiede durchaus nicht in allen Versuchen so eklatant waren. Das Verhalten der Kerntemperatur ließ sich statistisch nicht sichern.)

Die Integrale Hauttemperatur hat in beiden 23° -Versuchen bei $t = 100$ in etwa ihr endgültiges Niveau erreicht, während sich die Akrentemperaturen noch weiterändern. Dies unterstreicht die Zweifel an der IT als Charakteristikum für einen bestimmten thermischen Regulationszustand (Koe und Höfler 1963).

Weiter ist bemerkenswert, daß die Daumentemperatur in Versuch 1a relativ stark schwankt, ohne eine gerichtete Tendenz zu zeigen. Dieses Pendeln findet sich immer, wenn nicht eindeutig eine vasokonstriktorische oder eine vasodilatatorische Regulationslage vorherrscht (Aschoff 1947a). Der Daumen hat hier also noch die Möglichkeit, seine Wärmeabgabe zu variieren, was den Schluß zuläßt, daß die Bedingung 23/21 für die V_p P noch an der unteren Grenze des Indifferenzbereichs liegt.

Bei Versuch 1b sind die Verhältnisse schon anders. Der Daumen versucht zwar am Anfang noch zu regulieren, seine thermoregulatorische Kapazität ist jedoch bald erschöpft, und er zeigt die kontinuierliche Temperaturabnahme, die bei den 20°C -Versuchen noch viel deutlicher wird.

Die Zehe schwankt bei hoher Luftfeuchtigkeit noch geringfügig, bei 1b hat sie praktisch von Anfang an ihr Endniveau erreicht. Sie zeigt also in beiden

Versuchen weniger wärmeregulatorische Aktivität als der Daumen. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Befunden von Roth und Mitarbeitern (1940), nach welchen bei hoher Temperatur und Luftfeuchtigkeit mehr die untere Extremität, bei niedriger Temperatur und Luftfeuchtigkeit mehr die obere Extremität für die thermoregulatorische Feineinstellung verantwortlich ist.

Auffallend ist noch, daß die Zehentemperatur in den Versuchen mit geringer Luftfeuchtigkeit deutlich unter der Umgebungstemperatur liegt ($2,2^{\circ}$ in 1b, $1,2^{\circ}$ in 2b). Dies ist nur durch eine relativ starke Schweißsekretion zu erklären. Durch Wasserverdampfung wird zusätzlich Wärme entzogen. Die Zehe verhält sich hier wie ein Feuchttthermometer: Je trockener die umgebende Luft, umso tiefer liegt die Feuchtttemperatur unter der Trockentemperatur. Je höher die Luftfeuchtigkeit umso mehr ist die Verdampfung eingeschränkt, umso näher rückt die Feuchtttemperatur der Trockentemperatur, bis sie bei wasserdampfgesättigter Luft gleich sind.

b) Die Versuche bei 20°C (Abb. 2a, b)

Die Versuche 2a und b zeigen prinzipiell dasselbe Verhalten wie 1a und b. Die Absolutwerte liegen durchweg tiefer, die Temperaturen sinken während der Versuche fast doppelt so weit wie bei den 23°C -Versuchen. Dies ist ohne weiteres durch die tiefere Außentemperatur zu erklären. Die Unterschiede in der Endeinstellung bei verschiedenem Dampfdruck sind geringer als bei 1a und b.

Charakteristisch ist der einförmige, immer wiederkehrende Kurvenverlauf, der auch bei den anderen Versuchspersonen zu finden ist; Das kontinuierliche, immer langsamer werdende Absinken ohne Wendepunkt; ein gleichsam asymptotisches Zustreben auf die endgültige Einstellung.

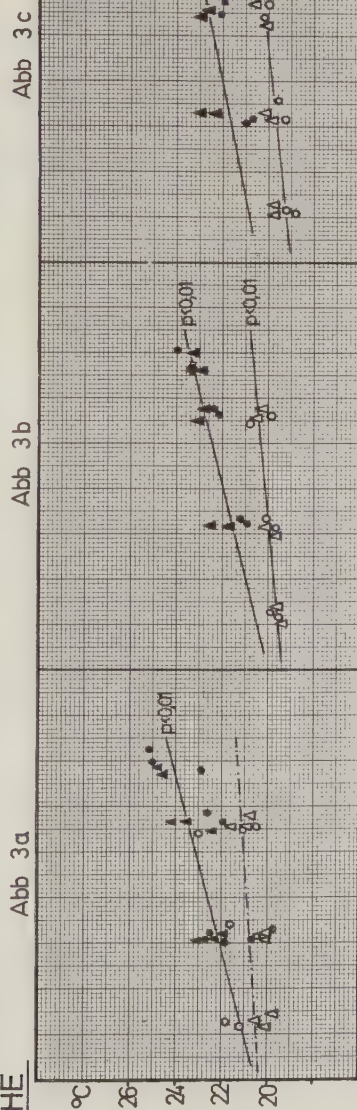
Dieses Verhalten legt nahe, daß schon bei $t = 0$ maximale Verengung der Gefäße herrscht, und daß das weitere Absinken der Temperaturen eine passive Auskühlung darstellt. Die Extremitäten würden sich also ähnlich verhalten wie ein rein physikalischer Körper, der von innen geringfügig, mehr oder weniger konstant, beheizt wird. Die einzige aktive Regulation bestünde in einer maximalen Vasokonstriktion von Beginn des Versuches an.

Fuß und Hand benötigen länger als Zehe und Daumen, bis sie ihre endgültige Gleichgewichtseinstellung erreicht haben. Dies dürfte mit dem unterschiedlichen Bau, mit der verschiedenen Masse und mit der verschieden ausgeprägten Fähigkeit zur Vasokonstriktion zusammenhängen (s. A₂).

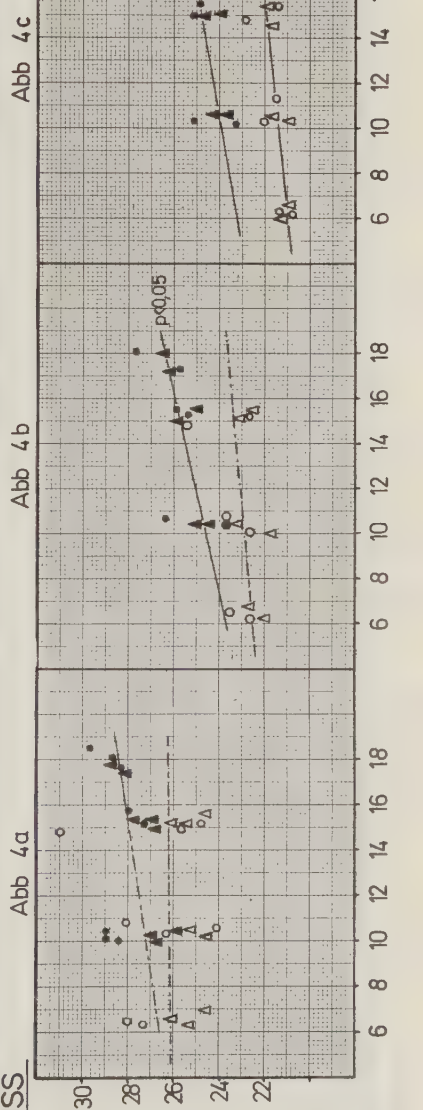
VpK ▲ Δ
VpP ● ○

DAMPFDRUCKABHÄNGIGKEIT DER EXTREMITÄTENTEMPATUREN VON VpK UND VpP

ZEHE



FUSS



23° 20°

vpK ▲
vpP ●
○

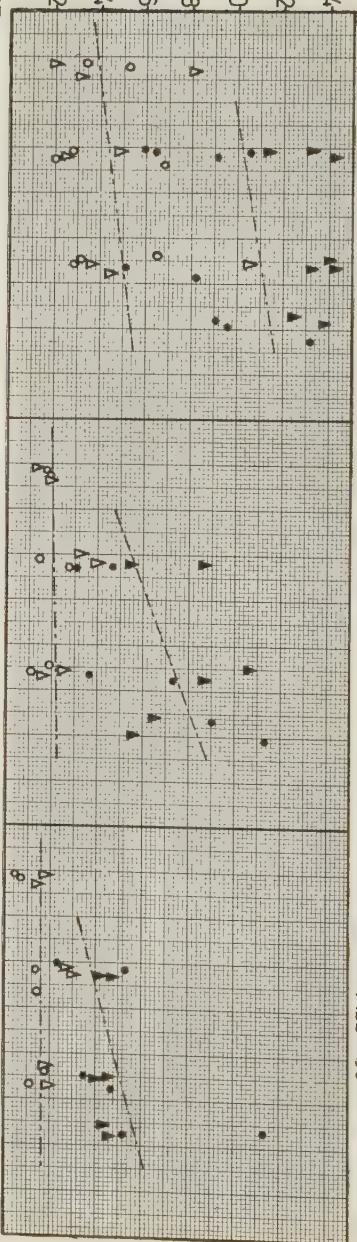
DAMPFDRUCKABHÄNGIGKEIT DER EXTREMITÄTENTEMPERATUREN VON vpK und vpP

DAUMEN

Abb 5a

Abb 5b

Abb 5c



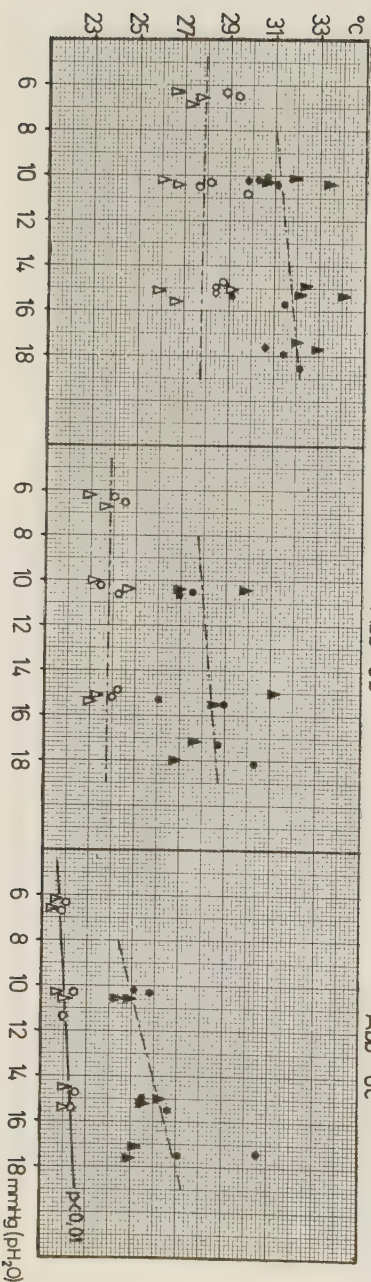
- 16 -

HAND

Abb 6a

Abb 6b

Abb 6c



18 mmHg (pH₂O)

2) Zusammenstellung der Akrentemperaturen von Vp K und Vp P

In den Abbildungen 3 - 6 sind die Zehen-, Fuß-, Daumen- und Handtemperaturen gegen den Wasserdampfdruck der Luft aufgetragen. Die Ergebnisse der 23 °C- und der 20 °C-Versuche sind zusammen dargestellt. Jeder eingezeichnete Punkt stellt das Mittel aus fünf aufeinanderfolgenden Ablesungen (im Abstand von 10 Minuten) von einem Versuch dar. Die Abbildungen 3a - 6a ("Anfang") geben den Zustand in der 2. halben Stunde, die Abbildungen 3b - 6b ("Mitte") den Zustand in der 5. halben Stunde nach Versuchsbeginn und 3c - 6c ("Ende") die Verhältnisse am Schluß der Versuche wieder.

Außer den gemessenen Temperaturen sind die berechneten Regressionsgeraden eingezeichnet, die die Abhängigkeit der Extremitätentemperaturen vom Dampfdruck der umgebenden Luft verdeutlichen sollen. Die ausgezogenen Linien entsprechen statistisch signifikanten Korrelationen ($p < 0,01$ bzw. $p < 0,05$). Der Rest läßt sich wegen der breiten Streuung der Ergebnisse bei dieser verhältnismäßig kleinen Versuchszahl nicht sichern.

In fast allen Abbildungen finden sich steigende Hauttemperaturen mit steigender Luftfeuchtigkeit, wie dies auch für den Indifferenzbereich bekannt ist. Zu Beginn der Versuche ist die Dampfdruckabhängigkeit am wenigsten gesichert, da hier die Ergebnisse am stärksten streuen. Dies ist bedingt durch die verschiedene thermoregulatorische Anamnese, deren Einfluß am Anfang der Versuche am größten ist und durch die noch ungenügende Klimaanlage. Entsprechend weisen die Abbildungen 3c - 6c am meisten gesicherte Korrelationen auf, da sich hier der Körper am längsten auf das jeweilige Klima einstellen konnte.

Am konstantesten im Verhalten ist die untere Extremität, besonders die Zehe, bei der sich in fünf von sechs vergleichbaren Versuchszuständen eine Temperaturabhängigkeit von der Luftfeuchte statistisch sichern läßt. Zwei Dinge zeichnen die Zehentemperatur im besonderen aus: 1) sie zeigt die geringsten Schwankungen innerhalb der einzelnen Versuchsgruppen, 2) sie liegt, besonders bei den Versuchen mit geringer Luftfeuchtigkeit teilweise unter der Umgebungstemperatur.

Diese beiden Tatsachen legen die Vermutung nahe, daß in dem untersuchten Bereich, sobald maximale Vasokonstriktion erreicht ist, die Zehentemperatur eine passive Funktion der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchtigkeit ist, wie dies in dem Abschnitt C_{1a} genauer ausgeführt ist.

Prinzipiell gleiches Verhalten (bei höheren Absolutwerten) zeigt der Fuß, wenn auch hier die Verhältnisse nicht so offensichtlich sind.

Daumen- und Handtemperatur weisen eine gleichsinnige Dampfdruckabhängigkeit wie die untere Extremität auf. Wegen einer starken Streuung der

Ergebnisse lassen diese sich jedoch nur einmal statistisch sichern (Hand 20°C "Ende", $p < 0,01$).

Diese Streuung könnte damit zusammenhängen, daß die obere Extremität in diesem niederen Temperaturbereich noch mehr die Möglichkeit hat, ihre Durchblutung und damit ihre Wärmeabgabe zu ändern als die untere Extremität. Die bei 23°C stärker in Erscheinung tretende Streuung wäre somit der Ausdruck von vasomotorischen Regulationen, wie sie für höhere Umgebungstemperaturen charakteristisch sind. Individuelle thermoregulatorische Komponenten der einzelnen Versuchspersonen wirken sich bei dieser Außentemperatur (23°) besonders stark aus. Dieser Temperaturbereich kann nämlich in gewisser Weise als Grenzbereich der Wärmeregulation angesehen werden: Je nach der thermoregulatorischen Ausgangssituation und individuell verschieden wird einmal die Durchblutung variiert, das andere mal sind die Gefäße von Versuchsbeginn an maximal kontrahiert.

Genauere Aussagen über die Art der Regulation (wenigstens für die obere Extremität) werden von den Wärmedurchgangszahlen bzw. von den Wärmeströmen erwartet.

3) Besprechung der Extremitätentemperaturen von Vp H (Abb. 7 und 8)

Vp H zeigt in mancherlei Hinsicht ein Verhalten, das von dem der beiden anderen Versuchspersonen abweicht. Bei gleicher Raumtemperatur stellt sie in allen Versuchen höhere Extremitätentemperaturen ein als Vp K und Vp P (als Beispiel Abbildung 7 und 8). Diese Besonderheit wurde auch schon in früheren Versuchen beobachtet. - Die Dampfdruckabhängigkeit ist auch bei Vp H nachzuweisen und ist in den meisten Fällen sogar außerordentlich stark ausgeprägt (Daumen, 20°C -Versuch, Abb. 7: im Mittel $6,7^{\circ}\text{C}$ Differenz bei gleicher Umgebungstemperatur!).

Außerdem war die Vp H viel kälteempfindlicher als die beiden anderen Versuchspersonen, so daß sie bei den 20°C -Versuchen eine leichte Bekleidung tragen mußte, um eine stärkere Stoffwechselsteigerung zu vermeiden. Die höhere Temperatureinstellung findet sich jedoch auch bei den Versuchen, die ohne Bekleidung durchgeführt wurden (23°C -Versuche), so daß sie nicht durch diese verursacht sein kann.

Dieses thermoregulatorisch andersartige Verhalten muß durch individuelle Gegebenheiten der Vp H bedingt sein. Dabei dürfte das schwächere Fettpolster und die vermutlich weniger ausgeprägte Fähigkeit zur Vasokonstriktion eine Rolle spielen.

ENDWERTE ALLER 3 VERSUCHSPERSONEN

Abb. 7

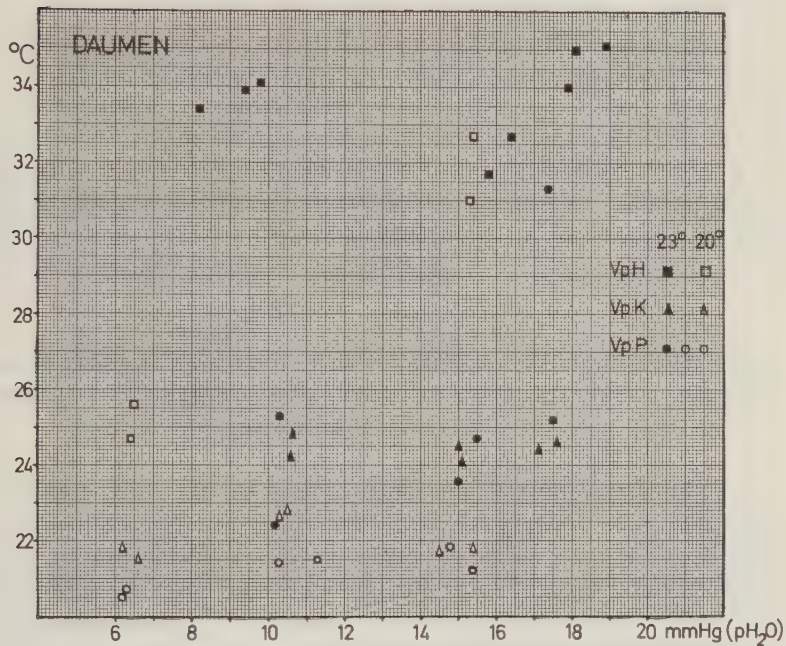
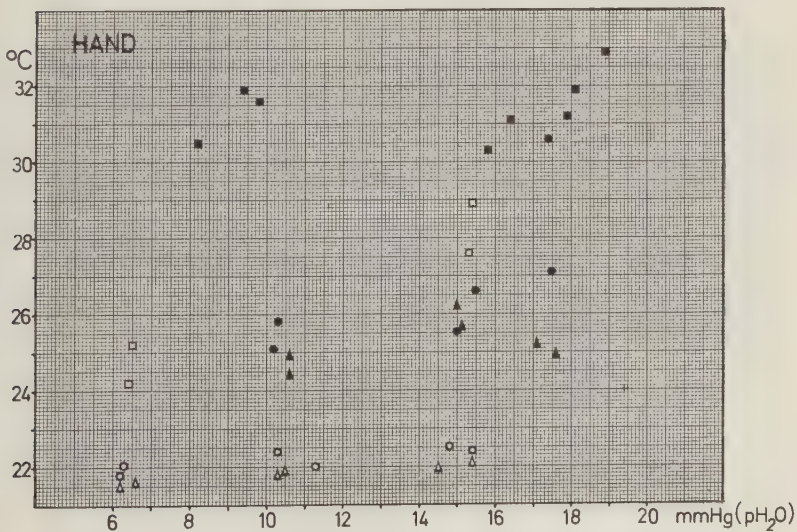


Abb. 8



Beide Faktoren sind zur Ausbildung einer ausgedehnten Schale, wie sie bei dieser Umgebungstemperatur erforderlich wäre, notwendig. Vielleicht hat auch das höhere Alter einen Einfluß.

Wegen diesen quantitativen Verschiedenheiten - gleiche Reaktion auf einem höheren Temperaturniveau - wurden die Ergebnisse der Vp H gesondert ausgewertet. Eine so große interindividuelle Streuung würde die statistische Berechnung bei der relativ kleinen Versuchszahl empfindlich stören.

Die Dampfdruckabhängigkeit der Extremitätentemperaturen ist so deutlich, daß sie sich mit dem Zeichentest sichern läßt. Hoher gegen niederer Dampfdruck, 23°C : $p < 0,005$; 20°C : $p < 0,025$.

4) Weitere Ergebnisse: Das Verhalten von Kerntemperatur, Integraler Hauttemperatur, Frigorigraphenwerten, Puls und Atmung

1) Die Kerntemperatur (Mundtemperatur) zeigt bei den 23°C -Versuchen eine leicht abfallende Tendenz mit steigendem Dampfdruck. Auch hier liegen die Werte der Vp H höher als die der beiden anderen Versuchspersonen. Bei 20°C Raumtemperatur dagegen steigt die Kerntemperatur bei höheren Dampfdruckwerten etwas an. In keinem Falle läßt sich jedoch eine systematische Abhängigkeit vom Dampfdruck statistisch sichern.

2) Die Integrale Hauttemperatur (IT) liegt in allen Versuchsgruppen bei höherer Luftfeuchtigkeit etwas höher. Der Unterschied zwischen feuchter und trockener Bedingung beträgt bei den 23°C -Versuchen im Mittel aller Versuchspersonen $0,3^{\circ}\text{C}$, bei den 20°C -Versuchen $0,5^{\circ}\text{C}$. Die Abhängigkeit vom Dampfdruck ist 3 mal zu sichern (23°C "Anfang", 20°C "Mitte", 20°C "Ende" jeweils $p < 0,05$). Die IT sinkt im Verlauf der Versuche (im Mittel) von $31,9$ auf $30,8^{\circ}\text{C}$ bei 23°C , von $30,7$ auf $28,6^{\circ}\text{C}$ bei 20°C Außentemperatur. Die subjektive Klimabeurteilung stimmte bei den Vpp K und P gut mit den Angaben von Pfeleiderer überein (zit. nach Dauber, 1964):

bei $33,7^{\circ}\text{C}$ IT die Empfindung behaglich
bei $31,0^{\circ}\text{C}$ IT die Empfindung indifferent
bei $28,2^{\circ}\text{C}$ IT die Empfindung kühl

Vp H empfand schon höhere Temperaturen als kühl usw.

- 3) Die Frigorigraphenwerte lassen keine Abhängigkeit vom Dampfdruck der Luft erkennen. Dies war nach dem Bau des Frigorigraphen nach Pfeleiderer und Büttner auch nicht zu erwarten. Die Abkühlungsgrößen lagen zwischen 28,3 und 31,4 bei 23 °C, zwischen 26,6 und 28,7 bei 20 °C Umgebungstemperatur.
- 4) Der Puls verhält sich ähnlich wie die Kerntemperatur. Bei 23 °C Raumtemperatur: niedrigere Werte bei hohem Dampfdruck, bei den 20 °C-Versuchen: höhere Werte bei hohem Dampfdruck. Wegen der großen Streuung lassen sich jeweils nur die Werte zu Versuchsende sichern (23 °C: $p < 0,05$; 20 °C: $p < 0,01$). Einer Erklärung hierfür fehlt jegliche Grundlage.

- 5) Große intra- und interindividuelle Schwankungen zeigt die Atemfrequenz. Eine Beeinflussung durch die Luftfeuchtigkeit ist nicht zu erkennen.

5) Die Wärmedurchgangszahl k_i in Abhängigkeit vom Dampfdruck P_d (Abb. 9)

Die mit der Kalorimeterpille nach Aschoff gemessenen Wärmedurchgangszahlen k_i (s. B₃) sollen Aufschluß über die Stärke der Durchblutung geben. Nach Wever und Aschoff (1957) besteht eine direkte Proportionalität zwischen der Durchblutungsgröße eines bestimmten Körperteils und den dazugehörigen k_i -Werten.

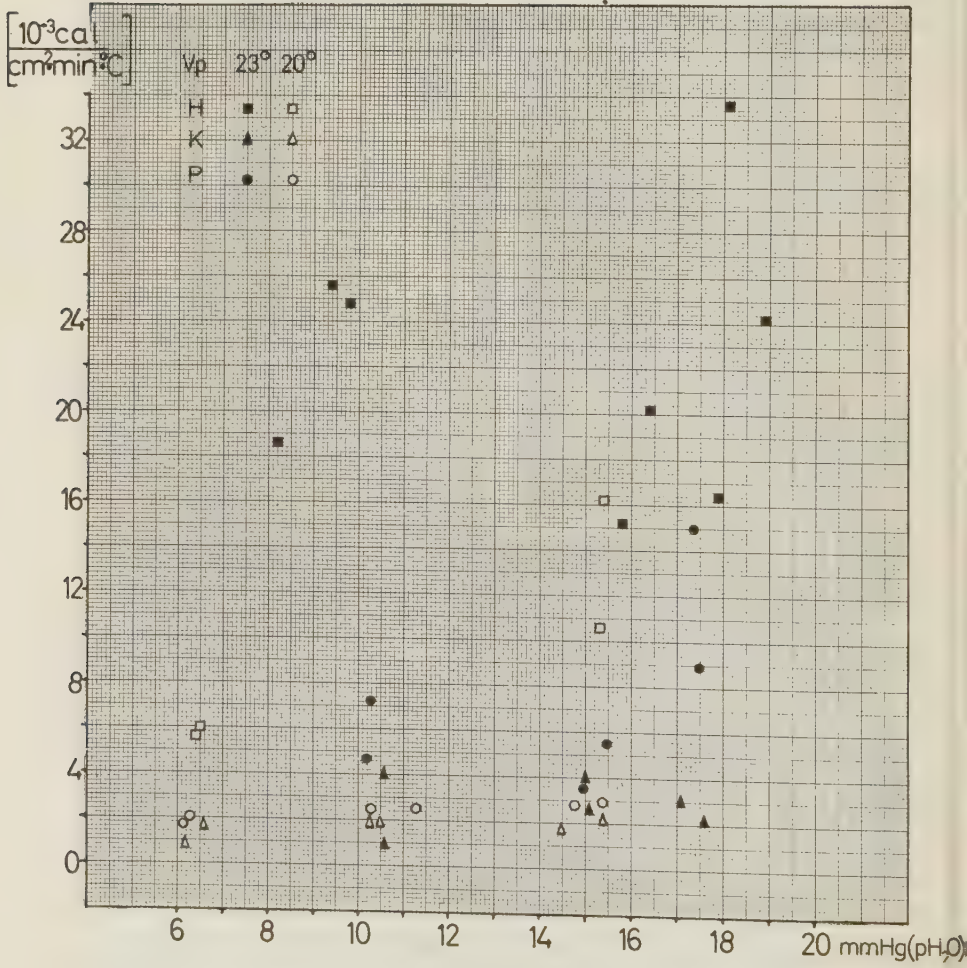
In unseren Versuchen wurden die Wärmedurchgangszahlen der Hand gemessen, so daß nur die Verhältnisse der oberen Extremität beurteilt werden können.

Wenn eine Abhängigkeit der k_i -Werte vom Dampfdruck vorhanden ist, so würde sich diese vor allem am Ende der Versuche zeigen, da hier eine ausgeglichene Regulation (Wärmeabgabe = Wärmebildung) am wahrscheinlichsten ist. In der Tat läßt sich eine solche Abhängigkeit für die 20 °C-Versuche für $V_p K$ und P mittels Korrelationsrechnung nachweisen ($p < 0,05$). $V_p H$ zeigt bei 20 °C Umgebungstemperatur ebenfalls deutlich steigende Wärmedurchgangszahlen mit steigendem Dampfdruck, jedoch wieder bei unvergleichbar höheren Absolutwerten (s. Abb. 9). Bei den 23 °C-Versuchen ist dagegen bei keiner der drei Versuchspersonen eine Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit zu erkennen.

Zuerst sollen die Ergebnisse bei 20 °C Raumtemperatur besprochen werden: Die höheren Wärmedurchgangszahlen bei höherer Luftfeuchtigkeit können als Ausdruck einer stärkeren Durchblutung in dem feuchteren Klima interpretiert

Abb. 9 WÄRMEDURCHGANGSZAHLEN DER HAND BEI VERSUCHSENDE

EINZELWERTE ALLER VERSUCHSPERSONEN



werden. Die weiter oben besprochene Erhöhung der Hauttemperatur, die eine Herabsetzung des inneren Wärmegefälles (Kern - Haut) und damit eine Verschlechterung der inneren Wärmetransportbedingungen bedeutet, hätte eine stärkere Durchblutung zur Folge, damit der innere Wärmestrom aufrechterhalten bleiben kann (s. A₂).

Einige weitere Ergebnisse sprechen jedoch gegen diese Deutung:

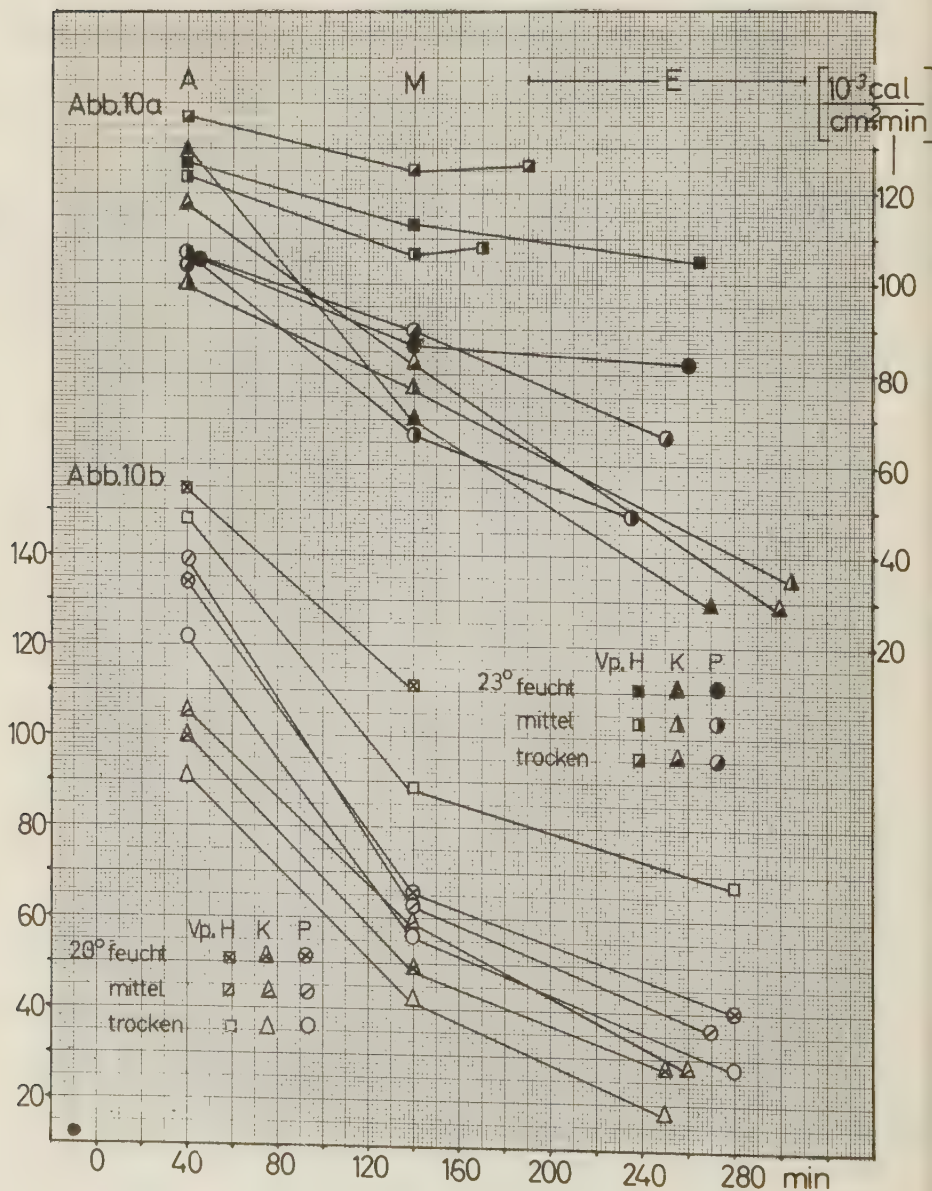
- 1) Bei den 23 ° C-Versuchen ist keine systematische Abhängigkeit vom Dampfdruck festzustellen.
- 2) Die interindividuelle Streubreite zwischen V_p K und V_p P ist sehr gering (zu V_p H s. C₃ und C₆).
- 3) Die Unterschiede in den Absolutwerten zwischen hohem und niederem Dampfdruck der V_p K und V_p P sind relativ klein (wie übrigens auch die Unterschiede der Handtemperaturen, s. Abb. 8).
- 4) Der Verlauf der Hand- (und restlichen Extremitäten-) Temperaturen innerhalb eines Versuches deuten auf eine passive Auskühlung hin (s. C_{1b}).
- 5) Während der 20 ° C-Versuche war bei den Versuchspersonen ein leichtes Kältezittern aufgetreten, weswegen hier mit einer gewissen Stoffwechselsteigerung gerechnet werden muß.
- 6) Die Extremitätentemperaturen haben auch nach verhältnismäßig langer Versuchsdauer ihren endgültigen Wert noch nicht erreicht; sie sinken zu Versuchsende noch um ein Zehntel innerhalb von 20 bis 30 Minuten.

Unter Berücksichtigung dieser Befunde bietet sich folgende Alternativerklärung an:

Die Schalenentspeicherung dauert bei einer so niedrigen Außentemperatur so lange, daß sich bei unseren Versuchen auch zu Versuchsende noch kein stationärer Wärmestrom eingestellt hat. Aus diesem Grunde kann per definitionem von unseren gemessenen k₁-Werten nicht auf die Durchblutung geschlossen werden. Die höheren Wärmedurchgangszahlen bei feuchtem Klima sind die Folge der bei diesem Klima höheren Extremitätentemperaturen, die erstens eine höhere (trockene) Wärmeabgabe und zweitens ein kleineres Kern - Haut - Gefälle bewirken und damit zu höheren k₁-Werten führen. Wie später erläutert werden wird (s. D₁), ist dazu nicht notwendigerweise eine stärkere Durchblutung erforderlich.

Die enge Streubreite zwischen den unter der gleichen Bedingung durchgeführten Versuchen derselben Versuchsperson und die geringen Unterschiede zwischen feuchter und trockener Bedingung legen eine - von der Luftfeuchtigkeit unabhängige - gleichbleibend kleine Durchblutung nahe (maximale Vasokonstriktion). Die Dampfdruckabhängigkeit der Wärmedurchgangszahlen wäre also nur eine scheinbare, hervorgerufen durch die verschiedenen Hauttemperaturen.

TROCKENE WÄRMEABGABE DER HAND WÄHREND DES VERSUCHSVERLAUFS
MITTELWERTE FÜR JEDE BEDINGUNG



Trifft die oben gegebene zweite Erklärung nicht zu, so kann zu den Ergebnissen der 23°C -Versuche (keine systematische Abhängigkeit der Wärmedurchgangszahlen von der Luftfeuchtigkeit) keine Stellung genommen werden. Trifft sie zu, so könnte man die Umgebungstemperatur von 23°C als Übergangsbereich betrachten, in dem weder rein vasomotorisch reguliert wird (wie im Indifferenzbereich) noch maximale Vasokonstriktion herrscht (wie z.B. bei 20°C Raumtemperatur). Interindividuelle und intraindividuelle Unterschiede (besonders auch die thermoregulatorische Anamnese) hätten in diesem Übergangsbereich besonders starke Auswirkungen (s. C_2). Damit wäre erklärlich, daß sich, angesichts der relativ kleinen Versuchszahl, bei 23°C Umgebungstemperatur keine Dampfdruckabhängigkeit der Wärmedurchgangszahlen nachweisen läßt.

6) Die Änderung des Wärmestroms Q während des Versuchsverlaufs und seine Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz Kern - Hand (T_{k-h})

Nachdem im vorigen Kapitel Zweifel über die Korrelation der von uns gemessenen Wärmedurchgangszahlen und der tatsächlichen Durchblutung geäußert worden sind, soll für weitere Überlegungen der Wärmestrom Q herangezogen werden. Q gibt an (in cal) wieviel Wärme pro Zeit- und Flächeneinheit von einer bestimmten Oberfläche an die Umgebung abgegeben wird.

In der Abbildung 10a und 10b ist der Wärmestrom Q gegen die Zeit aufgetragen. $t = 0$ entspricht dem Beginn der Versuche, A der Auswertung "Anfang", M "Mitte" und E dem Ende der Versuche (s. B_6). Die unter A (bei $t = 40$) eingezeichneten Werte stammen von fünf Messungen $t = 20, 30, 40, 50, 60$. Jeder eingetragene Punkt stellt den Mittelwert aller Versuche dar, die von einer Versuchsperson unter derselben Klimabedingung absolviert wurden. Entsprechendes gilt für die anderen Punkte.

Die mit steigender Versuchsdauer abfallenden Q -Werte besagen, daß die Hand umso weniger Wärme pro Zeiteinheit abgibt (trockene Wärmeabgabe), je länger die Exposition in dem entsprechenden Klima dauert. Dies ist die Auswirkung der sinkenden Hauttemperatur, die schon in C_1 besprochen wurde. - Die pro Versuchsperson und Bedingung eingezeichneten Werte stellen drei mehr oder weniger willkürliche Punkte von Exponentialkurven dar. Die vermutlich nach Versuchsende noch weitersinken. Es ist also noch kein stationärer Thermoregulationszustand erreicht (s. C_5).

Auffallend, besonders im Vergleich mit Abbildung 10a, ist der einheitliche und gleichförmige Verlauf der 20°C -Kurven. Es könnte daraus geschlossen werden,

daß die Hand immer in der gleichen Weise auskühlt; Der Wärmezustand zu Beginn des Versuches scheint für die EndEinstellung entscheidender zu sein als das umgebende Klima. Daß dies ein Trugschluß ist, zeigen sehr eindrucksvoll die Abbildungen 12 - 14. Er ist einmal darin begründet, daß bei den Wärmestrommessungen mit der Kalorimeterpille die feuchte Wärmeabgabe unberücksichtigt bleibt, zum andern darin, daß in Abbildung 10b Mittelwerte von mehreren Versuchen aufgezeichnet sind, wodurch die durch die verschiedene Luftfeuchtigkeit hervorgerufenen Differenzen in der Auskühlung verwischt werden. Nach wie vor spricht die Abbildung 10b dafür, daß die Hand passiv auskühlt - unbeeinflußt von Durchblutungsschwankungen, während das viel buntere und ungleichmäßigere Bild bei den 23°C -Versuchen vermutlich durch solche hervorgerufen wird (s. Abb. 10a).

Des weiteren demonstrieren die Abbildungen sehr deutlich das thermoregulatorisch ähnliche Verhalten von Vp K und Vp P, während Vp H mit allen Werten höher liegt. Dies beweist die schon in C₃ geäußerte Vermutung einer schlecht ausgeprägten Vasokonstriktion der Vp H und erklärt ihre erhöhte Kälteempfindlichkeit. Gleichzeitig unterstreicht es die Berechtigung, die Werte der Vp H getrennt von den beiden anderen Versuchspersonen auszuwerten.

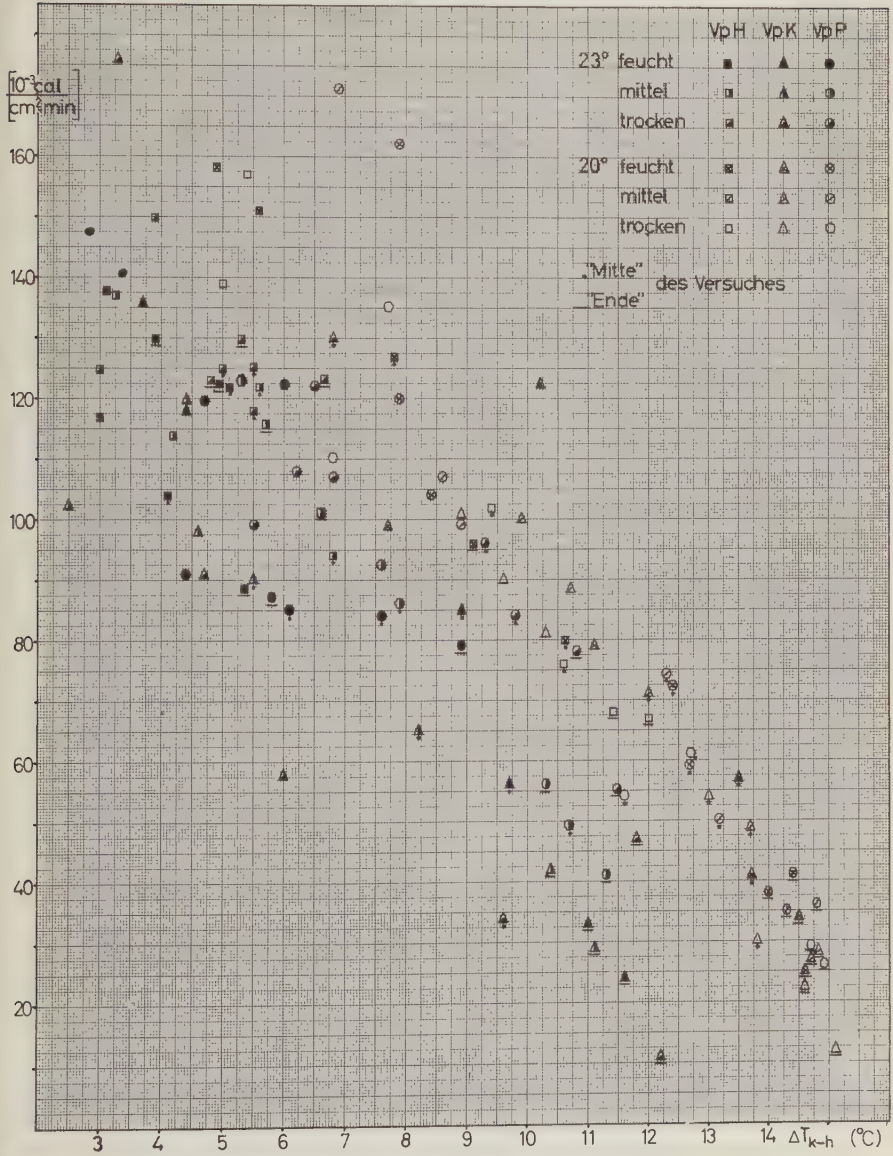
In Abbildung 11 sind sämtliche gemessenen Wärmeströme gegen die Differenz zwischen Kern- und Handtemperatur (ΔT_{k-h}) aufgetragen. Die eingezeichneten Punkte sind nach Versuchsperson und Klimabedingung aufgeschlüsselt. Außerdem sind die Q-Werte der Auswertung "Mitte" durch einen Punkt, die der Auswertung "Ende" (s. B₆) durch einen Strich gekennzeichnet. Die eingezeichnete Gerade soll die ungefähre Trennungslinie zwischen 23°C und 20°C -Werten darstellen. Sie darf nicht mit einer berechneten Regressionsgeraden verwechselt werden.

Zunächst sagt die Abbildung nur aus, daß einer bestimmten Handtemperatur, je nach Umgebungstemperatur, ein bestimmter Wärmestrom zugeordnet ist; Berücksichtigt man nur die trockene Wärmeabgabe, so ist der Wärmestrom der Hand bei gleicher Außentemperatur eine Funktion der Handtemperatur. Umgekehrt ist bei konstanter Handtemperatur der Wärmestrom von der Umgebungstemperatur abhängig: Die gleich warme Hand gibt bei 23°C Raumtemperatur weniger Wärme ab als bei 20°C ; deshalb liegen die Meßpunkte der 20°C -Versuche höher.

Das lineare Absinken der Q-Werte mit steigendem ΔT_{k-h} ist eine spezifische Extremitäteneigenschaft. Bei niedriger Umgebungstemperatur kann die Wärmeabgabe bis auf sehr geringe Werte gedrosselt werden. Der Gesamtkörper verhält sich in dieser Beziehung anders: Wird die Kern - Haut - Differenz größer als 4°C , so steigt die Gesamtwärmeabgabe wieder an, da nun die chemische Wärme produktion zur Aufrechterhaltung einer ausgeglichenen Temperaturregulation

Abb.11

TROCKENE WÄRMEABGABE DER HAND IN ABHÄNGIGKEIT VON
DER TEMPERATURDIFFERENZ KERN- HAND (ΔT_{k-h})



herangezogen wird (Aschoff 1958a).

Eine Extrapolation der 20°C -Werte würde die X-Achse ungefähr bei $\Delta T_{k-h} = 17^{\circ}\text{C}$ treffen. Die Hand hätte Umgebungstemperatur angenommen, so daß keine Wärme mehr durch trockene Wärmeabgabe abgegeben werden kann ($Q_a = 0$). Analoges gilt für die Ergebnisse der 23°C -Versuche.

Weitere Aussagen sind durch Differenzierung nach verschiedenen Klimabedingungen und nach der Zeit ("Anfang", "Mitte", "Ende") möglich. Die höchsten Q-Werte und gleichzeitig die größte Streuung finden sich zu Beginn der Versuche, während die vergleichbaren Werte zu Versuchsende, besonders bei 20°C , verhältnismäßig eng zusammenliegen. Eine Ausnahme macht wieder Vp H, deren Endwerte größtenteils auf einem Niveau liegen, das die beiden anderen Versuchspersonen zu Beginn des Versuchs erreicht hatten. - Interessant ist, daß die Wärmeabgabe am Ende der Versuche bei 23°C und bei 20°C , zumindest für Vp K, in der selben Größenordnung liegen. Die dazugehörigen Hauttemperaturen liegen jeweils ungefähr 2°C über der Umgebungstemperatur. Offensichtlich geht die weitere Auskühlung von da an nur sehr langsam weiter. Es darf jedoch angenommen werden, daß die Wärmeabgabe bei länger dauernder Exposition noch weiter eingeschränkt werden kann.

Auch die Dampfdruckabhängigkeit der Q-Werte ist auf der Abbildung zu erkennen. Sie ist für den ganzen Versuchsverlauf mit dem Zeichentest gesichert (hoher gegen niedriger Dampfdruck, 23°C : $p < 0,005$; 20°C : $p < 0,025$). Bei der EndEinstellung lassen sich nur die Ergebnisse der 20°C -Versuche durch Korrelationsrechnung sichern ($p < 0,05$ für Vp K und Vp P). Die Abhängigkeit von der Luftfeuchte dürfte im wesentlichen die Folge der verschiedenen Handtemperaturen sein (s. C₂).

D) DISKUSSION

1) Der Einfluß der Luftfeuchtigkeit auf die Körpertemperaturen

Die Wärmeregulation des Menschen kann unter zwei verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet werden, je nachdem, in welchen Klimabedingungen er sich befindet. Um den Unterschied zu verdeutlichen seien zunächst einige teleologische Überlegungen erlaubt.

Über der Kritischen Temperatur, d.h. im Indifferenzbereich und darüber (s. A_2), ist die immer wieder auftauchende Frage:
Was unternimmt der Körper, damit er die in seinem Kern produzierte Wärme an die Umgebung abgeben kann?

Da die Wärmeproduktion eng mit dem Stoffwechsel gekoppelt ist, kann sie nicht unter eine bestimmte Größe (den Grundumsatz) verringert werden. Deswegen wird zur Aufrechterhaltung des Wärmegleichgewichts die Variation der Wärmeabgabe herangezogen. Die Reaktionsmöglichkeiten des Körpers sind hinlänglich bekannt: a) Änderung der Hautdurchblutung, damit der Hauttemperatur und dadurch Änderung der vorwiegend trockenen Wärmeabgabe. b) Veränderung der Schweißsekretion und damit der feuchten Wärmeverluste. Die hervorragende Bedeutung der Extremitäten für diese Regulationen ist von Aschoff ausführlich untersucht und beschrieben worden (1958b).

Unter der Kritischen Temperatur, also in dem Bereich, der in dieser Arbeit untersucht wurde, muß die Frage lauten:
Was für Möglichkeiten hat der Körper, um sich vor fortschreitender Auskühlung zu schützen?

Auch diese Frage ist schon seit langem beantwortet: a) Steigerung der Wärmeproduktion (durch Muskelzittern). b) weitestmögliche Einschränkung der Wärmeabgabe (durch Vasokonstriktion und damit vergrößerte Schale). Die Extremitäten, die infolge ihres günstigen Oberflächen/Volumen-Verhältnisses sehr viel

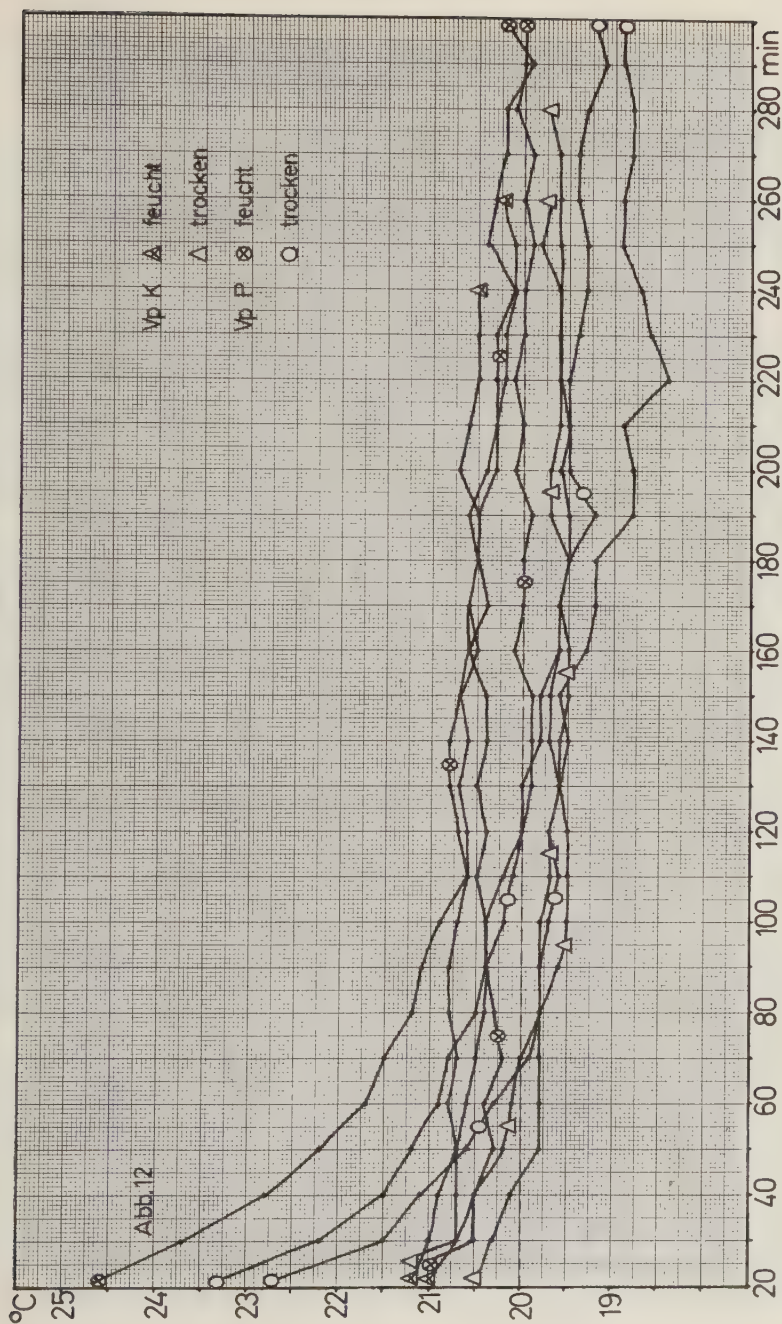
Wärme abgeben können, würden die Auskühlung des Körpers ungeheuer beschleunigen, hätten sie nicht auf der anderen Seite die Möglichkeit, ihre Durchblutung in einem Ausmaß herabzusetzen, wie es in anderen Körpergebieten nicht möglich ist. Dadurch können die Extremitätentemperaturen weitgehend absinken, und die Wärmeabgabe bleibt auf verhältnismäßig geringe Beträge beschränkt.

Aschoff fand (1958a), daß unter 21°C Raumtemperatur die Handtemperatur annähernd mit der Umgebungstemperatur absinkt, und daß die Durchblutung in diesem Bereich konstant klein bleibt. Diese Befunde und die Erfordernisse des Gesamtwärmehaushalts (nach denen sich die Schalendurchblutung richtet) sprechen dafür, daß auch in unseren Versuchen eine maximale Verengung der Gefäße vorliegt (zumindest bei den 20°C -Versuchen).

Ein wichtiges Ergebnis dieser Arbeit ist die Abhängigkeit der Extremitätentemperaturen (und in geringem Umfang der Integralen Hauttemperatur) vom Dampfdruck der Luft, und zwar finden sich höhere Temperaturen bei höherer Luftfeuchtigkeit. Zu denselben Ergebnissen kamen R. Thauer und W. Müller im Indifferenzbereich. Die Erklärung dieser Befunde war folgende:

Die bei hohem Dampfdruck der Luft eingeschränkte Perspiratio insensibilis bedeutet eine Verschlechterung der äußeren Wärmeübergangsbedingungen (k_a in Formel 3 wird kleiner). Deswegen muß zur Erhaltung des äußeren Wärmestroms (da T_u konstant ist) die Hauttemperatur ansteigen, bis $Q_a = Q_i$ ist. Nachdem jedoch bei ansteigender Hauttemperatur ($T_k - T_h$) kleiner wird, ist es (bei gleichbleibender Wärmeproduktion und annähernd konstanter Kerntemperatur) notwendig, daß k_i ansteigt, damit die im Kern gebildete Wärme an die Oberfläche abtransportiert werden kann. Die einzige Möglichkeit zur Verbesserung der inneren Wärmeübergangsbedingungen ist eine Steigerung der Durchblutung, so daß also die höheren Hauttemperaturen bei hohem Dampfdruck durch vermehrte Durchblutung zustande kämen.

Formal kann diese Erklärung auf die Ergebnisse dieser Arbeit übertragen werden. Zu Beginn dieses Kapitels ist jedoch erläutert worden, daß sich die Thermoregulation unterhalb der Kritischen Temperatur in einer prinzipiell anderen Lage befindet. Vom Standpunkt des Gesamtwärmehaushalts aus betrachtet wäre deswegen eine Erhöhung der Durchblutung als aktiver Regulationsschritt wenig sinnvoll, weil damit die Wärmeabgabe vergrößert würde. Auch bei Änderung der Luftfeuchtigkeit kann es sich nicht darum handeln, einen inneren oder äußeren Wärmestrom zu gewährleisten, sondern immer nur darum, die Wärmeverluste des Körpers möglichst klein zu halten. - Deswegen nehmen die Extremitäten nicht aktiv an der Regulation teil. Sie können mehr oder weniger getrennt vom übrigen Körper betrachtet werden und spielen nur insofern im Gesamthaushalt eine Rolle, als sie dem Körper eine bestimmte Wärmemenge entziehen.



Wie kommen nun die höheren Temperaturen bei höherem Dampfdruck zustande?

Gibt es eine Erklärung ohne die Hypothese einer Durchblutungsänderung?

Im folgenden soll eine Deutung versucht werden.

Schon in Kapitel C₁ wurde berichtet, daß die Zehentemperaturen in unseren Versuchen teilweise unter der Umgebungstemperatur liegen. Zur Demonstration sind in Abbildung 12 noch einmal die Verläufe der Zehentemperaturen von Vp K und Vp P unter der trockenen und feuchten Bedingung bei 20 °C aufgezeichnet. Es fällt auf, daß die Temperaturen der feuchten Bedingung maximal 0,1 °C unter der Umgebungstemperatur liegen (was im Fehlerbereich der Meßeinrichtung bzw. der Klimaeinstellung liegt), während die Temperaturen der trockenen Bedingung nach $t = 120$ ausnahmslos unter der Außentemperatur liegen (z. T. um mehr als 1,5 °C). Auch das zu Beginn der Versuche verschiedene Ausgangsniveau ändert an dieser Tatsache nichts. Diese Unterschiede, die mit $p < 0,01$ gesichert sind, können nicht mit Durchblutungsänderungen erklärt werden. Sobald die Hauttemperatur unter die Umgebungstemperatur sinkt, müssen andere Faktoren im Spiele sein. Dieses Verhalten wurde schon weiter oben als Einfluß der Perspiration gedeutet: Neben der trockenen Wärmeabgabe werden der Zehe noch zusätzlich Kalorien durch Wasserverdampfung entzogen. Da unter feuchten Klimabedingungen die Wasserverdampfung eingeschränkt ist, wirkt sich dieser Mechanismus in trockener Umgebung viel stärker aus, d.h. die Zehe kühlt hier viel schneller aus (steilerer Kurvenverlauf in Abb. 12). Ist die Zehentemperatur erst einmal unter die Außentemperatur gesunken, so wird $(T_h - T_u)$ negativ, d.h. der äußere Wärmestrom kehrt sich um, die Zehe nimmt konduktiv Wärme von der Umgebung auf. Die endgültige Zehentemperatur wird auf einen Stand einreguliert, in dem sich Wärmezufuhr durch eine konstante minimale Durchblutung und durch Wärmeaufnahme von der Umgebung auf der einen und Wärmeabgabe durch Verdunstung auf der anderen Seite das Gleichgewicht halten. Die Zehentemperatur ist also mehr oder weniger eine passive Funktion des umgebenden Klimas und der Perspiratio insensibilis. Aus diesem Grunde war die Dampfdruckabhängigkeit der unteren Extremität deutlicher, da hier die Perspiration lebhafter ist.

Nichts spricht dafür, daß für den Fuß bzw. die Hand ein anderer Mechanismus gilt. In vier wesentlichen Eigenschaften unterscheidet sich jedoch der Fuß von der Zehe (bzw. die Hand vom Daumen), wodurch die Verhältnisse unübersichtlicher werden:

- 1) Das kleinere Oberflächen/Volumen-Verhältnis und damit die schlechteren Wärmeübergangsbedingungen (k_a wird kleiner)
- 2) Die größere Masse und damit der größere Wärmeinhalt
- 3) Die schwächere Perspiratio insensibilis und schließlich

4) Die geringer ausgeprägte Fähigkeit zur Vasokonstriktion.

Die drei ersten Faktoren werden dazu führen, daß z.B. der Fuß langsamer auskühlt als die Zehe. Tatsächlich ist sein endgültiges Temperaturniveau auch in unseren fünfstündigen Versuchen noch nicht erreicht, während sich die Zehentemperatur schon nach zwei Stunden nicht mehr wesentlich ändert. Die beiden letzten Faktoren werden zur Folge haben, daß die Fuß- (und Hand-) Temperatur auch bei noch längerem Zuwarten nicht auf so niedrige Werte absinkt, wie es die Zehen- und Daumentemperatur tun.

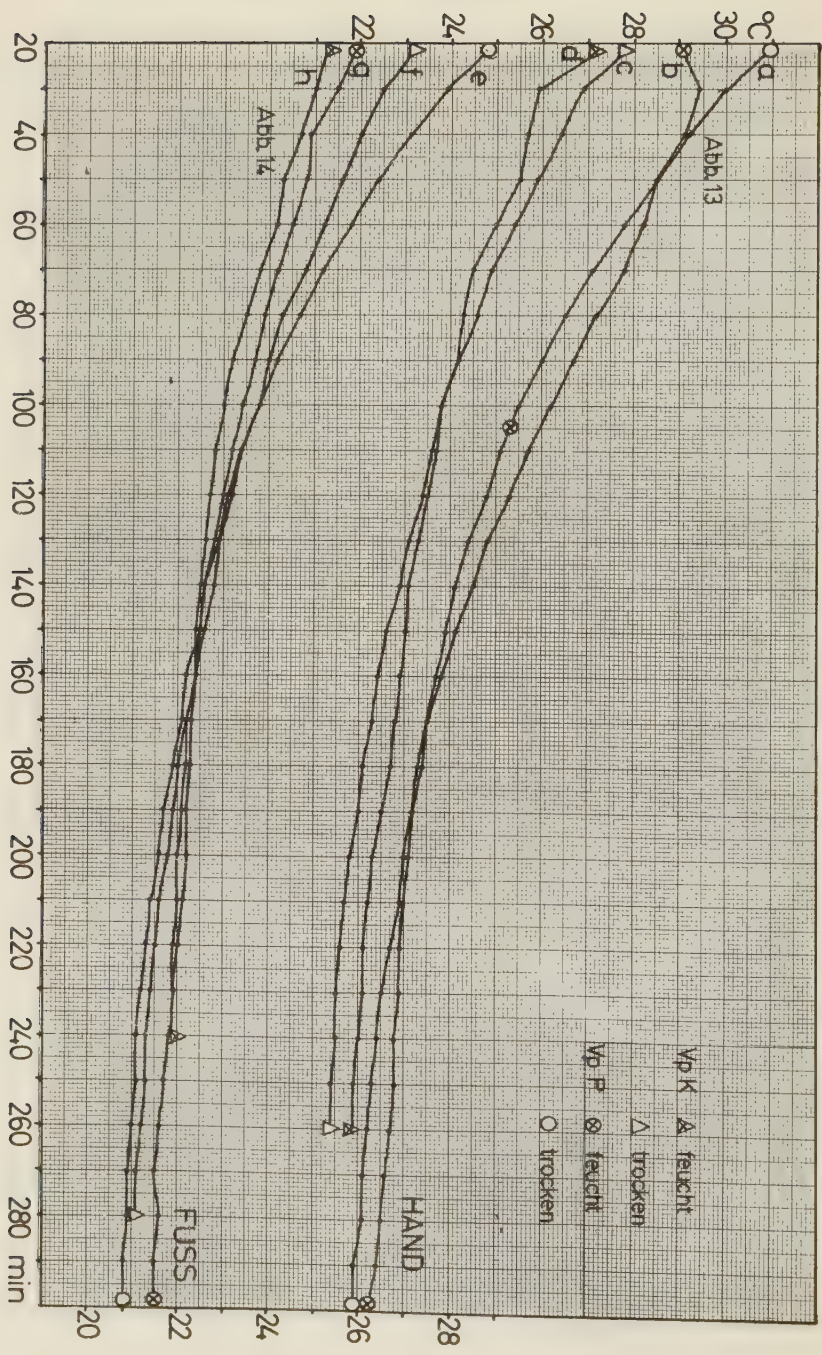
Das Sinken der Fuß- und Handtemperaturen im Verlauf der Versuche wäre also der Ausdruck einer passiven Auskühlung (Schalenentspeicherung), die durch das verschiedene Wirksamwerden der Perspiratio insensibilis, je nach dem Dampfdruck der umgebenden Luft, variiert wird: Je feuchter die Umgebung, umso langsamer die Auskühlung.

Daneben könnte die Wärmeabstrahlung vom Körper einen Einfluß auf die Schnelligkeit der Auskühlung haben. Bei hoher Luftfeuchtigkeit wird ein Teil der vom Körper abgegebenen Ultrarot-Strahlung durch die Flüssigkeit in der Luft absorbiert und bewirkt eine "Gegenstrahlung", so daß die effektive Ausstrahlung des Körpers vermindert ist (Höfler 1963). Allerdings dürfte dieser Einfluß bei so dicht über der Umgebungstemperatur liegenden Hauttemperaturen, wie es bei den Extremitäten der Fall ist, sehr gering sein. Ansonsten müßten auch die eingetragenen Meßpunkte in Abb. 11 einen Einfluß der Luftfeuchtigkeit erkennen lassen: Dieselbe Hauttemperatur müßte in feuchterem Klima zu niedrigeren Wärmeströmen führen (trockene Wärmeabgabe), was offensichtlich nicht zutrifft. Einen größeren Einfluß könnte die Strahlung beim Zustandekommen der Dampfdruckabhängigkeit der Integralen Hauttemperatur haben, da hier die Körpertemperaturen höher liegen und deswegen die Wärmeabgabe durch Strahlung mehr ins Gewicht fällt.

Die verschiedene Auskühlgeschwindigkeit darf jedoch nicht so interpretiert werden, daß nach hinreichend langem Abwarten die Extremitäten unabhängig von der Luftfeuchtigkeit gleiche Temperatur hätten. Wenn man eine konstant kleine "Beheizung von innen" (= Durchblutung) annimmt, so würde auch nach vollständig entspeicherter Schale das trockenere Klima zu niedrigeren Hauttemperaturen führen. Die stärkere feuchte Wärmeabgabe bedingt eine niedrigere Hauttemperatur und damit Einschränkung der trockenen Wärmeverluste, während die Gesamtwärmeabgabe konstant bleibt.

Um die verschieden schnelle Auskühlung zu zeigen, sind in Abb. 13 und 14 Verläufe der Hand- und Fußtemperaturen während der 20 °C-Versuche der Vp K und Vp P bei trockener und feuchter Umgebung aufgezeichnet. Mit Absicht sind solche Versuche ausgewählt worden, bei denen (zufällig, infolge der

VERLAUF DER HAND- UND FUSSTEMPERATUREN VON VP K UND VP P
BEI 20° C RAUMTEMPERATUR



verschiedenen thermoregulatorischen Anamnese) das Anfangsniveau der Trockenversuche höher liegt als das der Feuchtversuche. Unter solchen Umständen muß die verschiedene Auskühlgeschwindigkeit durch verschiedene Steigung und durch Überkreuzung der zusammengehörigen Kurven besonders deutlich zum Ausdruck kommen. Tatsächlich verlaufen in Abb. 13 diejenigen Kurven, die bei feuchter Umgebung gewonnen sind, ausnahmslos flacher als die entsprechenden Kurven der Trockenversuche. Allerdings sind die Unterschiede in der Schnelligkeit der Auskühlung nicht sehr groß. Sie führen erst nach relativ langer Versuchsdauer zu verhältnismäßig geringen Unterschieden der Endwerte. (Die Kurven a - d stammen durchweg von anderen Versuchen als die Kurven e - h. Die Schwankungen am Anfang der Kurven b, d und f können von kleinen Durchblutungsänderungen herrühren, wie sie in der ersten Versuchsstunde noch vorkommen mögen).

Es muß jedoch zugegeben werden, daß geringe Unterschiede in der Stärke der Durchblutung zu ähnlichen Kurven führen würden, wie sie in der Abb. 13 dargestellt sind. Abgesehen davon, daß ein solcher Regulationsschritt vom Standpunkt des Gesamtwärmehaushalts aus betrachtet weder sinnvoll noch notwendig wäre, sprechen die in C₅ aufgeführten sechs Punkte gegen eine Änderung der Durchblutung. Die letzte Entscheidung kann jedoch erst durch weitere Versuche getroffen werden, in denen die Durchblutung der Hand plethysmographisch gemessen wird.

Das bisher Gesagte gilt in erster Linie für die Umgebungstemperatur von 20 °C. Die 23 °C-Versuche, die ebenfalls eine Dampfdruckabhängigkeit der Extremitätentemperaturen aufweisen, unterscheiden sich von den 20 °C-Versuchen durch ihre größeren Unterschiede in der Endeinstellung und durch ihre stärkere inter- und intraindividuelle Streuung. Dies legt die Beteiligung einer physiologischen Regulation nahe. Nachdem diese Außentemperatur in thermoregulatorischer Hinsicht zwischen dem Indifferenzbereich (Änderung der Hauttemperatur durch Änderung der Durchblutung) und dem weiter oben besprochenen Bereich (Änderung der Hauttemperatur durch verschiedenes Wirksamwerden der Perspiratio insensibilis) liegt, ist wahrscheinlich, daß hier die Hauttemperatur durch ein Zusammenwirken beider Mechanismen zustande kommt. In individuell verschiedenem Ausmaß wäre einmal mehr die erste, das andere mal mehr die zweite Möglichkeit für die Einregulierung der Hauttemperatur verantwortlich.

2) Die mit der Kalorimeterpille gemessenen Wärmedurchgangszahlen und ihre Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit

Voraussetzung für eine Proportionalität zwischen Wärmedurchgangszahlen und Durchblutung ist ein stationärer Wärmestrom. Da bei unseren Versuchen auch zu Versuchsende die Extremitätentemperaturen noch weitersinken, kann von unseren gemessenen k_i -Werten nicht auf die tatsächliche Durchblutung geschlossen werden. Die zur k_i -Berechnung gemessenen Wärmeströme sind Ausdruck einer fortschreitenden Schalenentspeicherung.

Am stärksten wirkt sich diese langsame Auskühlung an Körperteilen mit großer Wärmekapazität (z. B. Rumpf, Oberschenkel) aus, während solche mit großem Oberflächen/Volumen-Verhältnis (z. B. Finger) schneller entspeichert sind. Hier führt jedoch die starke Vasokonstriktion zu einer so niedrigen Hauttemperatur, daß diese sich infolge der Perspiratio insensibilis in Abhängigkeit vom Dampfdruck der umgebenden Luft passiv auf verschiedene Höhe einreguliert. Die höhere Hauttemperatur bei feuchter Umgebung führt zu höheren Q -Werten, während $(T_k - T_h)$ kleiner wird. Dadurch erhält man größere k_i -Werte als bei trockener Umgebung, obwohl die Durchblutung in beiden Fällen gleichbleibend klein ist.

Die Kalorimeterpille ist also bei niederen Umgebungstemperaturen (unter dem Indifferenzbereich) zum Vergleich der Extremitätendurchblutung bei gleicher Temperatur und verschiedenen Luftfeuchtigkeiten ungeeignet.

Nachdem Thauer und Mitarbeiter (1954) auch für den Indifferenzbereich eine Abhängigkeit der Perspiratio insensibilis von Temperatur und Luftfeuchtigkeit fanden, und nachdem mit der Kalorimeterpille nur die trockene Wärmeabgabe der Haut gemessen wird, ist auch in diesem Temperaturbereich eine Fehlerquelle für die Wärmedurchgangszahl gegeben.

Infolge der geringen Unterschiede der Perspiration dürfte die Abweichung von der tatsächlichen Wärmedurchgangszahl auch bei relativ starken Dampfdruckänderungen vermutlich unter 1 - 2 % liegen, während sie bei spontan eingestellter Luftfeuchtigkeit noch geringer ist. So kleine Fehler können jedoch in der Praxis vernachlässigt werden.

3) Frigorigraphenwerte und Integrale Hauttemperatur unterhalb des Indifferenzbereichs

Wie aus theoretischen Überlegungen nach dem Bauprinzip des Frigorigraphen von Pfleiderer und Büttner zu schließen war, zeigen die Abkühlungsgrößen auch unterhalb des Indifferenzbereichs keine Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit, während die Integralen Hauttemperaturen geringfügig mit steigendem Dampfdruck ansteigen. Dieselben Verhältnisse wurden von W. Müller im Indifferenzbereich gefunden. Er hatte davor gewarnt, die Abkühlungsgrößen des Frigorigraphen kritiklos zur Beurteilung einer Klimawirkung heranzuziehen, da außer der Integralen Hauttemperatur noch viel mehr die Extremitätentemperaturen von der Luftfeuchtigkeit beeinflußt werden, was für die thermische Wirkung eines bestimmten Klimas noch kennzeichnender ist.

Die Situation ist unterhalb der Kritischen Temperatur insofern etwas anders, als die Dampfdruckabhängigkeit der Integralen Hauttemperatur viel geringer ist als im Indifferenzbereich. Außerdem ist auch der (von der Luftfeuchtigkeit abhängige) Unterschied in der EndEinstellung der Extremitätentemperaturen sehr viel kleiner als bei höheren Raumtemperaturen und wahrscheinlich nicht die Folge einer Änderung im Wärmehaushalt.

Deshalb sind die Bedenken gegen die Abkühlungsgrößen des Frigorigraphen als Maßstab zur Beurteilung der thermoregulatorischen Wirkung einer bestimmten Klimakombination unterhalb des Indifferenzbereichs weniger berechtigt. Die Variation der Integralen Hauttemperatur und der Extremitätentemperaturen zwischen zwei Versuchspersonen, besonders bei verschiedener thermoregulatorischer Anamnese, ist sicher größer als die systematische Abhängigkeit dieser Temperaturen von der Luftfeuchtigkeit.

E) ZUSAMMENFASSUNG

In 46 Versuchen an drei Versuchspersonen wurden die Körpertemperaturen bei 20 °C und 23 °C Raumtemperatur und bei jeweils drei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten untersucht. Daneben wurden die Wärmeabgabe der Hand mit der Kalorimeterpille nach Aschoff und die Abkühlungsgrößen des Frigorigraphen nach Pfleiderer und Büttner gemessen.

Ergebnisse:

- 1) Es wurde wahrscheinlich gemacht, daß die mit steigendem Dampfdruck höher liegenden Extremitätentemperaturen nicht die Folge einer stärkeren Durchblutung sind, sondern durch die verschiedene Wirkung der Perspiratio insensibilis zustandekommen.
- 2) Die Wärmedurchgangszahlen der Hand können bei so niedriger Raumtemperatur mit der Kalorimeterpille nicht gemessen werden, da sich (nach teilweise fünfstündigem Versuchsverlauf) kein stationärer Wärmestrom einstellt. Aus anderen Befunden muß auf maximale Vasokonstriktion der Extremitätengefäße, unabhängig von der Luftfeuchtigkeit, geschlossen werden.
- 3) Die Korrelation zwischen der Abkühlungsgröße des Frigorigraphen und der Integralen Hauttemperatur bzw. den Extremitätentemperaturen ist unterhalb der Kritischen Temperatur durch die Luftfeuchtigkeit weniger gestört als im Indifferenzbereich, da die Dampfdruckabhängigkeit sämtlicher Körpertemperaturen bei niedriger Umgebungstemperatur sehr gering ist.

Diese Ergebnisse gelten in erster Linie für die 20 °C-Versuche. Bei 23 °C Außen-temperatur sind - allerdings individuell sehr verschiedene - vasomotorische Regulationen beteiligt, und die Verhältnisse gleichen mehr denen vom Indifferenzbereich.

F) LITERATURVERZEICHNIS

- (1) ASCHOFF J., Pflüg. Arch. 247, 469 (1944 a)
480 (1944 b)
- (2) ASCHOFF J., Pflüg. Arch. 249, 125 (1947 a)
137 (1947 b)
148 (1947 c)
- (3) ASCHOFF J., Klin. Wschr. 33, 545 (1955)
- (4) ASCHOFF J., Klin. Wschr. 36, 193 (1958 a)
- (5) ASCHOFF J., Wiener Med. Wschr. 108, 404 (1958 b)
- (6) ASCHOFF J. und F. KAEMPFFER, Pflüg. Arch. 249, 112 (1947)
- (7) ASCHOFF J. und R. WEVER, Verhandlungen der Deutschen Gesellschaft
für Kreislaufforschung. 23. Tagung, S. 375 (1957)
- (8) ASCHOFF J. und R. WEVER, Die Naturwissenschaften 45, 477 (1958)
- (9) BARCROFT H., K. D. BOCK, H. HENSEL und A. H. KITCHIN,
Pflüg. Arch. 261, 199 (1955)
- (10) Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone Nr. 38
- (11) DAUBERT K., Hippokrates 35, 655 (1964)
- (12) EFFENBERGER E., Therapiewoche 13, 644 (1965)
- (13) HARTMANN und BRAUN (Firma), Gebrauchsanweisung für den
Frigorigraph nach Pfeleiderer und Büttner
- (14) HENSEL H., Klin. Wschr. 34, 1273 (1956)
- (15) HÖFLER W., Med. Welt 16, 899 (1963)
- (16) HÖGGER D., Industrielle Arbeit bei großer Hitze
Sonderheft der Nummer 51 der "Volkswirtschaft" Bern (1947)

- (17) KAUFMANN W., R. THAUER, G. ZÖLLNER, Pflüg. Arch. 261, 189 (1955)
- (18) KOE K. F. und W. HÖFLER, Pflüg. Arch. 278, 93 (1963)
- (19) KÖNIG F. H., Pflüg. Arch. 247, 497 (1944)
- (20) LANDOIS - ROSEMAN, Lehrbuch der Physiologie, 28. Aufl. (1960)
- (21) MÜLLER E. A. und H. G. WENZEL, Die Beurteilung des Arbeitsklimas, Handbuch der ges. Arbeitsphysiologie Bd. I (1961)
- (22) MÜLLER W., Dissertation, Tübingen 1965
- (23) ROTH G. M., B. T. HORTON and C. SHEARD, Amer. J. Physiol. 126, 782 (1940)
- (24) THAUER R. und G. ZÖLLNER, Pflüg. Arch. 258, 58 (1953)
- (25) THAUER R., G. ZÖLLNER und W. KAUFMANN Pflüg. Arch. 260, 1 (1954)
- (26) THAUER R., W. KAUFMANN und G. ZÖLLNER Pflüg. Arch. 261, 183 (1955)
- (27) WEVER R. und J. ASCHOFF, Pflüg. Arch. 264, 272 (1957)
- (28) ZÖLLNER G. und R. THAUER, Pflüg. Arch. 259, 281 (1954)
- (29) ZÖLLNER G., R. THAUER, W. KAUFMANN Pflüg. Arch. 260, 261 (1954)

Meinen aufrichtigen Dank an Herrn Dozent Dr. Höfler für die Überlassung des Themas; besonders aber für die - im wahrsten Sinn des Wortes - persönliche Hilfe bei der Arbeit, indem er sich als Versuchsperson zur Verfügung stellte und bei der Auswertung der Ergebnisse jederzeit gerne zu Auskünften bereit war.

Herrn Professor Dr. Fischer danke ich für die Erlaubnis, die für die Versuche notwendigen Einrichtungen zu benützen, Herrn Professor Dr. Knüttgen für die Übernahme des Korreferats. Nicht zuletzt gilt mein Dank Fräulein Behrmann, die sich beim Registrieren der Versuche und beim Anfertigen der Zeichnungen in aufopfernder Weise eingesetzt hat.

Lebenslauf

Am 14. August 1940 bin ich, Gerhard Kolb, als Sohn des Dr. med. Georg Kolb und seiner Ehefrau Frieda, geborene Hunsinger in Walddorf Kreis Tübingen geboren. Von 1946 bis 1950 besuchte ich die Volksschule in Walddorf, anschließend das Johannes Kepler-Gymnasium in Reutlingen, wo ich 1959 das Abitur ablegte.

Im Herbst 1959 begann ich mit dem Studium der Tierheilkunde an der Universität München, wechselte aber nach zwei Semestern in die Medizin über. Im Frühjahr 1963 bestand ich das Physikum und studierte mein erstes klinisches Semester noch an der Universität München. Den Rest meines klinischen Studiums verbrachte ich an der Universität Tübingen, wo ich auch im Januar 1967 das Staatsexamen ablegte.

